BANCO DE PRUEBAS PARA EL ANÁLISIS DE CAVITACIÓN EN UNA BOMBA CENTRÍFUGA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE EMISIONES ACÚSTICAS

DIEGO ROBERTO GELVEZ DIAZ
JHONY ALEXANDER MARTELO PARADA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2.010

BANCO DE PRUEBAS PARA EL ANÁLISIS DE CAVITACIÓN EN UNA BOMBA CENTRÍFUGA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE EMISIONES ACÚSTICAS

DIEGO ROBERTO GELVEZ DIAZ
JHONY ALEXANDER MARTELO PARADA

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Director
ALFONSO GARCIA CASTRO
Ingeniero Mecánico

Codirector
JABID QUIROGA MENDEZ
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2.010

Universidad Industrial de Santander

NOTA DEL PROYECTO DE GRADO

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: JHONY ALEXANDER MARTELO PARADA	CODIGO: 2006931
TITULO DEL PROYECTO: BANCO DE PRUEBAS PARA EL ANÁLISIS DE CAVITACIÓN EN UNA BOMBA CENTRÍFUGA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE EMISIONES ACÚSTICAS	
REGISTRO No. / FACULTAD: Ingenierías FisicoMecánicas	CARRERA: Ingeniería Mecánica
CALIFICACION (letra y número): A (APROBADO)	CREDITOS: 8
DIRECTOR DEL PROYECTO — NOMBRE: ALFONSO GARCIA CASTRO	FIRMA
CALIFICADORES — F X CARLOS BORRAS PINILLA Dir. Esc.	F JABID QUIROGA MENDEZ
FECHA: A 10 / M 11 / D 8	
Original: Oficina de Admisiones y Contabilidad Académica	
Copias: Coordinación de Carrera	

Universidad Industrial de Santander

NOTA DEL PROYECTO DE GRADO

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: JHONY ALEXANDER MARTELO PARADA	CODIGO: 2006931
TITULO DEL PROYECTO: BANCO DE PRUEBAS PARA EL ANÁLISIS DE CAVITACIÓN EN UNA BOMBA CENTRÍFUGA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE EMISIONES ACÚSTICAS	
Ingenierías FisicoMecánicas	Ingeniería Mecánica
CALIFICACION (letra y número): **5.0 (CINCO COMA CERO)**	CREDITOS: 8
DIRECTOR DEL PROYECTO — NOMBRE: ALFONSO GARCIA CASTRO	FIRMA
CALIFICADORES — F CARLOS BORRAS PINILLA Dir. Esc.	F JABID QUIROGA MENDEZ
FECHA: A 10 / M 11 / D 8	
Original: Oficina de Admisiones y Contabilidad Académica	
Copias: Coordinación de Carrera	

Bucaramanga, 26 de julio del 2.010

Universidad Industrial de Santander

NOTA DEL PROYECTO DE GRADO

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: JHONY ALEXANDER MARTELO PARADA	CODIGO: 2006931
TITULO DEL PROYECTO: BANCO DE PRUEBAS PARA EL ANÁLISIS DE CAVITACIÓN EN UNA BOMBA CENTRÍFUGA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE EMISIONES ACÚSTICAS	
REGISTRO No. / FACULTAD: Ingenierías FisicoMecánicas	CARRERA: Ingeniería Mecánica
CALIFICACION (letra y número): A (APROBADO)	CREDITOS: 8
DIRECTOR DEL PROYECTO — NOMBRE: ALFONSO GARCIA CASTRO	FIRMA
CALIFICADORES — F X CARLOS BORRAS PINILLA Dir. Esc.	F JABID QUIROGA MENDEZ
FECHA: A 10 / M 11 / D 8	
Original: Oficina de Admisiones y Contabilidad Académica	
Copias: Coordinación de Carrera	

Universidad Industrial de Santander

NOTA DEL PROYECTO DE GRADO

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: JHONY ALEXANDER MARTELO PARADA	CODIGO: 2006931
TITULO DEL PROYECTO: BANCO DE PRUEBAS PARA EL ANÁLISIS DE CAVITACIÓN EN UNA BOMBA CENTRÍFUGA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE EMISIONES ACÚSTICAS	
Ingenierías FisicoMecánicas	Ingeniería Mecánica
CALIFICACION (letra y número): **5.0 (CINCO COMA CERO)**	CREDITOS: 8
DIRECTOR DEL PROYECTO — NOMBRE: ALFONSO GARCIA CASTRO	FIRMA
CALIFICADORES — F CARLOS BORRAS PINILLA Dir. Esc.	F JABID QUIROGA MENDEZ
FECHA: A 10 / M 11 / D 8	
Original: Oficina de Admisiones y Contabilidad Académica	
Copias: Coordinación de Carrera	

Bucaramanga, 26 de julio del 2.010

ENTREGA DE TRABAJOS DE GRADO, TRABAJOS DE INVESTIGACION O TESIS Y AUTORIZACIÓN DE SU USO A FAVOR DE LA UIS

Nosotros, Diego Roberto Gelvez Díaz y Jhony Alexander Martelo Parada, mayores de edad, vecinos de Bucaramanga, identificados con las Cédulas de Ciudadanía No. 91532298 de Bucaramanga y No. 91514808 de Bucaramanga, actuando en nombre propio, en nuestra calidad de autores del trabajo de grado, del trabajo de investigación, o de la tesis denominada(o):

BANCO DE PRUEBAS PARA EL ANÁLISIS DE CAVITACIÓN EN UNA BOMBA CENTRÍFUGA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE EMISIONES ACÚSTICAS,

hacemos entrega del ejemplar respectivo y de sus anexos de ser el caso, en formato digital o electrónico (CD o DVD) y autorizamos a LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, para que en los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia, utilice y use en todas sus formas, los derechos patrimoniales de reproducción, comunicación pública, transformación y distribución (alquiler, préstamo público e importación) que nos correspondan como creadores de la obra objeto del presente documento. PARÁGRAFO: La presente autorización se hace extensiva no sólo a las facultades y derechos de uso sobre la obra en formato o soporte material, sino también para formato virtual, electrónico, digital, óptico, uso en red, Internet, extranet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

LOS AUTORES – ESTUDIANTES, manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y la realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es de su exclusiva autoría y detenta la titularidad sobre la misma. PARÁGRAFO: En caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, EL AUTOR / ESTUDIANTE, asumirá toda la responsabilidad, y saldrá en defensa de los derechos aquí autorizados; para todos los efectos la Universidad actúa como un tercero de buena fe.

Para constancia se firma el presente documento en dos (02) ejemplares del mismo valor y tenor, en Bucaramanga, a los 21 días del mes de Octubre de Dos Mil Diez 2010.

LOS AUTORES /ESTUDIANTES:

(Firma)……

Nombre: Diego R. Gelvez Díaz

(Firma)……

Nombre: Jhony A. Martelo Parada

DEDICATORIA

A Dios,
Por habernos permitido llegar hasta este punto y habernos dado salud para lograr nuestros objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A nuestros padres,
A nuestros hermanos.
A mis hijos,
A nuestra familia,
A nuestros amigos

A Ramón Martelo Payares que en Paz descanse
A Henrry Leandro Prada Suarez que en Paz descanse

Diego Roberto Gelvez Díaz.
Jhony Alexander Martelo Parada.

AGRADECIMIENTOS

A mi padre Roberto, mi madre Noralba por su apoyo, esfuerzo y dedicación incondicional, por estar siempre presentes en mi vida guiándome con amor, paciencia y sabiduría.

A Cristian Gelvez Blanco, por su respaldo incondicional, por sus palabras, por creer en mí a pesar de los caminos que nos toca recorrer.

A Alfonso García Castro, ingeniero mecánico, director del proyecto y amigo, por su respaldo, confianza y colaboración oportuna.

A Jabid Quiroga Mendez, ingeniero mecánico, codirector del proyecto y amigo, por su respaldo, confianza y colaboración oportuna.

A Silvia Oviedo Castillo, ingeniera electrónica, por su respaldo, confianza y colaboración oportuna.

A mis amigos, que durante el pregrado me apoyaron en todo momento y junto a ellos aprendimos el verdadero significado de la amistad; *sinónimo de hermandad.*

.

Diego Roberto Gelvez Díaz.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Yolanda y mi padre Ramón por su apoyo, esfuerzo y dedicación incondicional, por estar siempre presentes en mi vida guiándome con amor, paciencia y sabiduría.

A mi hermano Nelson por su colaboración, lealtad, confianza y afecto.

A mi abuela Carmen por su afecto, acogida y apoyo en mi formación como persona y profesional

.

A mi abuelo Ramón por su afecto, acogida y apoyo en mi formación como persona y profesional, que en paz descanse.

A Alfonso García Castro, Ingeniero Mecánico, director del proyecto y amigo, por su respaldo, confianza y colaboración oportuna.

A Jabid Quiroga Méndez, Ingeniero Mecánico, codirector del proyecto y amigo, por su respaldo, confianza y colaboración oportuna.

A Silvia Oviedo Castillo, Ingeniera Electrónica, por su respaldo, confianza y colaboración oportuna.

A mis amigos, que durante el pregrado me apoyaron en todo momento y junto a ellos aprendimos el verdadero significado de la amistad*; sinónimo de hermandad.*

Jhony Alexander Martelo Parada.

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN **19**

1. BOMBAS CENTRÍFUGAS **21**

1.1 NET POSITIVE SUCTION HEAD (NSPH) 24

1.2 CAVITACIÓN EN BOMBAS CENTRÍFUGAS 25

1.2.1 Coeficiente de cavitación Thoma. 29

1.2.2 Tipos de cavitación. 30

1.2.3 Implosión de la burbuja. 30

1.2.4 Daño por cavitación. 31

2. EMISIONES ACÚSTICAS **33**

2.1 DESCRIPCIÓN DE LAS EMISIONES ACÚSTICAS 35

2.1.1 Tipos de emisiones acústicas. 36

2.1.1.1 Infrasonido. 36

2.1.1.2 Sonidos audibles. 36

2.1.1.3 Ultrasonido (o sonograma). 37

2.1.1.4 Microsonidos. 38

2.2 ELECTROACÚSTICA 38

2.3 EMISIONES ACÚSTICAS GENERADAS POR LA CAVITACIÓN 39

3. DISEÑO DEL BANCO DE ENSAYO **42**

3.1 ESQUEMA DEL BANCO DE ENSAYO 42

3.1.1 Base. 43

3.1.2 Bomba Centrífuga 44

3.1.3 Depósito. 45

3.1.4 Sistema de tuberías. 47

3.1.5 Bomba de vacío. 48

3.2.1. Sistema hidráulico 50

3.2.2. Diseño de la base. 56

4. OBTENCION Y MANEJO DE LA SEÑAL. 60

4.1 DESCRIPCIÓN DEL SENSOR. 60

4.2 TRANSFERENCIA DE LAS EMISIONES ACÚSTICAS 61

4.2.1 Acoplador. 62

4.3 PREAMPLIFICADOR INTEGRAL DEL SENSOR 62

4.3.1 Características 63

4.3.2 Descripción de funcionamiento. 63

4.3.3 Especificaciones eléctricas 64

4.3.4 Especificaciones físicas 64

4.4 ALIMENTACIÓN DEL SENSOR Y DESACOPLE DE LA SEÑAL 65

4.5 OSCILOSCOPIO 66

4.5.1 Formato CSV. 68

4.6. ANÁLISIS DE LA SEÑAL CON MATLAB. 69

4.6.1 MATLAB. 69

4.6.2 Manejo de los datos de la señal. 69

5. ENSAYO DE CAVITACIÓN DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA 72

5.1 PUNTO DE INSPECCIÓN EN LA BOMBA 77

5.2 ANÁLISIS DE LOS DATOS 80

5.2.1 Análisis de los datos caso 1. 80

5.2.2 Análisis de los datos caso 2. 81

5.2.3 Análisis de los datos caso 3. 82

5.2.4 Análisis de los datos caso 4. 83

CONCLUSIONES **85**

RECOMENDACIONES **87**

BIBLIOGRAFÍA **88**

ANEXOS **90**

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Despiece de la bomba. 21

Figura 2. Distribución de presiones en los álabes del rodete. 26

Figura 3. Zona de cavitación en los álabes. 27

Figura 4. Comparación entre ebullición y cavitación. 28

Figura 5. Erosión de la burbuja en las paredes de la bomba. 32

Figura 6. Aéreas de conocimiento y de aplicación de la acústica. 33

Figura 7. Rango de frecuencias de las emisiones acústicas. 38

Figura 8. Localización del ruido ocasionado por diferentes factores. 39

Figura 9. Espectro acústico de una bomba con cavitación. 41

Figura 10. Esquema del Banco de Ensayo de Cavitación. 42

Figura 11. Esquema de la base del banco. 43

Figura 12. Bomba centrífuga 44

Figura 14. Depósito 46

Figura 15. Esquema del Sistema de tuberías 47

Figura 16. Sistema de tuberia en el banco 48

Figura 17. Unidad compresora utilizada como bomba de vacío. 49

Figura 18. Nivel de agua del depósito. 50

Figura 19. Banco de cavitación 52

Figura 20. Longitudes (mm) de los tramos del sistema de Tuberías 53

Figura 21.Curva de la bomba de Q vs Hbb 54
Figura 22.Punto de corte entre la curva de la bomba y la del sistema. 55
Figura 23.Base del banco en Solid Edge. 57
Figura 24.Esfuerzo equivalente base grande 58
Figura 25. Factor de seguridad de la base. 59
Figura26. Sensor acústico WDIU-AST 60
Figura 27. Tipos de acopladores 62
Fuente: AE Sensors & Preamplifiers Users Manual 62
Figura 28. Diagrama de bloques del sensor 64
Figura 29. Circuito alimentador del desacoplador de señal. 65
Figura 30. Esquema para la captura de la señal. 66
Figura31. Sistema para la captura de la señal. 67
Figura 32. Conexión sistema de adquisición. 67
Figura 33. Memoria SD en el osciloscopio. 68
Figura 34. Banco de cavitación por vació 73
Figura 35. Puntos de inspección 78
Figura 36. Análisis de los puntos de inspección. 79
Figura 37. Esquema acústico caso 1. 80
Figura 38. Esquema acústico caso 2. 81
Figura 39. Esquema acústico caso 3. 82
Figura 40. Esquema acústico caso 4. 83

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Lista de piezas de la bomba. 22

Tabla 2. Tensión superficial y presión de vapor del agua. 29

Tabla 3. Comportamiento de la bomba. 45

Tabla 4. Datos obtenidos en el diseño hidráulico 56

Tabla 5. Datos iníciales para el desarrollo del laboratorio 75

Tabla 6. Datos de la práctica caso 1 75

Tabla 7. Datos de la práctica caso 2 76

Tabla 8. Datos de la práctica caso 3 76

Tabla 9. Datos de la práctica caso 4 77

Tabla 10. Valores RMS caso 1. 80

Tabla 11. Valores RMS caso 2. 81

Tabla 12. Valores RMS caso 3. 82

Tabla 13. Valores RMS caso 4. 83

LISTA DE ANEXOS

Pág.

ANEXO A. CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA CENTRÍFUGA. 91

ANEXO B. DIAGRAMA DE MOODY 93

ANEXO C. SENSOR 94

ANEXO D. MANUAL DE USUARIO DEL BANCO DE CAVITACIÓN 119

ANEXO E. DESACOPLADOR DE SEÑAL. 128

ANEXO F. PÉRDIDAS EN TUBERÍAS Y ACCESORIOS. 132

ANEXO G. ARTÍCULO. 134

NOMENCLATURA O GLOSARIO

NOTACIÓN

A	Área, m^2.
A1	Amplitud
EA	Emisión acústica
D	Diámetro, m.
F	Factor de fricción.
F	frecuencia
g	Aceleración gravitacional, m/s^2.
H	altura, m
Hbb	Altura generada por la bomba, m
pv	Presión de vacío, cmHg
pd	Presión de descarga, Psi
ps	Presión de succión, psi
Q	Caudal, GPM
L(teq)	Longitud total equivalente, m
L(tsist)	Longitud total del sistema, m
Re	Número de Reynolds.
V	Velocidad, m/s

LETRAS GRIEGAS

η	Eficiencia
λ	Longitud de onda, μm.
μ	Viscosidad dinámica, Kg.m/s.

SUBÍNDICES

1,2 Se refiere al punto que se está analizando succión y descarga.

RESUMEN

TÍTULO:
BANCO DE PRUEBAS PARA EL ANÁLISIS DE CAVITACIÓN EN UNA BOMBA CENTRÍFUGA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE EMISIONES ACÚSTICAS[*].

AUTORES:
Diego Roberto Gelvez Díaz
Jhony Alexander Martelo Parada[**]

PALABRAS CLAVES:
Cavitación, NSPHr, NSPHd, Acústica.

DESCRIPCIÓN:

El objetivo de este proyecto es dotar a la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, de un banco de pruebas que permita utilizarse como complemento de la asignatura de vibraciones y turbo máquinas hidráulicas "Banco de pruebas para el análisis de cavitación en una bomba centrífuga mediante el análisis de emisiones acústicas".

El banco de pruebas se diseñó y se calculó bajo las teorías de falla, diagrama de Moody, ecuación de Coolebroocky ayuda de herramientas computacionales para la iteración y cálculos del comportamiento del fluido de trabajo y la onda de estudio resultado de la cavitación en la bomba centrífuga.

Los resultados de este proyecto se muestran en un síntesis sobre el fenómeno en estudio, además se deja un banco que permite conocer y estudiar el fenómeno de cavitación por medio de un sensor piezoeléctrico y un sistema de adquisición de datos que transforman este fenómeno en una señal que permite ver el comportamiento a diferentes niveles (mínimo a máximo), logrados por medio de una bomba de vacío y una válvula reguladora de caudal; también se puede estudiar la cavitación y comprender de una manera más directa el perjuicio de este fenómeno en una bomba centrífuga, por medio de los manómetros y barómetro.

[*]Trabajo de grado
[**]Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Ing. Alfonso Garcia. Codirector: Ing. Jabid Quiroga.

ABSTRACT

TITLE:
BANK OF TESTS FOR ANALYSIS OF CAVITATION IN A CENTRIFUGAL PUMP USING ACOUSTIC EMISSION ANALYSIS.*

AUTHORS:
Diego Roberto Gelvez Díaz**
Jhony Alexander Martelo Parada**

KEY WORDS:
Cavitation, NSPHr, NSPHd, Acoustics.

DESCRIPTION:

The objective of this project is to provide the school of Mechanical Engineering at the Universidad Industrial de Santander, of a bank of test that allows be used to supplement the subject of vibration and hydraulic turbo machines "BANkS OF TESTS FORY ANALYSYS OR CAVITATION IN A CENTRIFUGAL PUMP USING ACOUSTIC EMISSION ANALYSIS "

The test was designed and calculated under the theories of failure, Moody diagram, equation of Coolebroock and assistance of computational tools for iteration and calculations of the behavior of the working fluid and the wave of the study result in the centrifugal pump cavitation.

The results of this project are displayed in a summary of studied phenomenon, also left a bank that allow to know and study the phenomenon of cavitation by means of a piezoelectric sensor and data acquisition system that transforms this phenomenon into a sign that lets you see the behavior at different levels (minimum to maximum), achieved through a vacuum pump and a flow control valve, also we can study cavitation and understand in a more direct form damage of this phenomenon in a bomb centrifuge, using gauges and barometer.

---

* Degree Work
** Physical-Mechanical Sciences Faculty, Mechanical Engineering. Directress: Eng Alfonso Garcia. Codirectress: Eng Jabid Quiroga.

INTRODUCCIÓN

Las bombas centrífugas son máquinas diseñadas para convertir la energía mecánica entregada por un motor eléctrico, neumático o de combustión interna en energía hidráulica; este tipo de maquinaria es implementada con gran frecuencia en plantas de producción, como se ve en torres de enfriamiento, intercambiadores de calor, bancos de pruebas en laboratorios, etc., lo que hace deseable evitar en lo posible malos funcionamientos de la bomba ya sea por tipo mecánico o hidráulico la cual lleva a la bomba a presentar fallas por vibraciones, caídas de presión, cavitación (falla en estudio), etc. No es deseable que la bomba funcione en cavitación, puesto que esta falla reduce su eficiencia y disminuye su durabilidad, produciendo picaduras tanto en el impulsor como en la voluta, llevando al proceso en un estado de funcionando ineficiente y en algunos casos a quedar en espera por mantenimientos correctivos, o cambio definitivo de la bomba.

En las bombas centrífugas es posible detectar de la cavitación por inspección de sus características de funcionamiento, como son ruidos excesivos o anómalos, recalentamiento o verificando que el sistema este trabajando de forma ineficiente, pero teniendo en cuenta que este tipo de inspección se logra siempre y cuando la bomba esté en un lugar accesible y en ambientes en los cuales el operador o la persona a cargo puede escuchar. Muchas de estas están en ambientes muy ruidosos y de poco acceso, como se ve en muchas plantas de producción.

Por las razones anteriores, se desarrolla la presente tesis de grado, titulada “Banco de pruebas para el análisis de cavitación en una bomba centrífuga mediante el análisis de emisiones acústicas”. Este banco permite al estudiante de pregrado conocer e interactuar con el fenómeno de cavitación presentado en

bombas centrífugas, desarrollando una técnica de mantenimiento predictivo para la detección del mismo.

El capítulo 1 tiene como fin presentar los conceptos fundamentales del fenómeno de cavitación y teoría de emisiones acústicas los cuales son el principio básico y motivo de realización de este proyecto.

Este análisis define todos los términos utilizados en este estudio y explica la diferencia entre NSPHd Y NSPHr, además, explica todo lo referente a ondas de sonido y su clasificación según frecuencia audible.

El capítulo 2, presenta las características del banco y sus cálculos de diseño y operación, mostrando un circuito cerrado que trabaja en condiciones normales dentro de los límites permitidos por el fabricante de la bomba y demás accesorios incluidos en el circuito con una eficiencia muy aceptable.

El capítulo 3, muestra la modelación, interpretación y análisis del espectro acústico generado por la cavitación.

Finalmente, el capítulo 4 muestra un ejemplo de aplicación completo del banco (práctica de laboratorio).

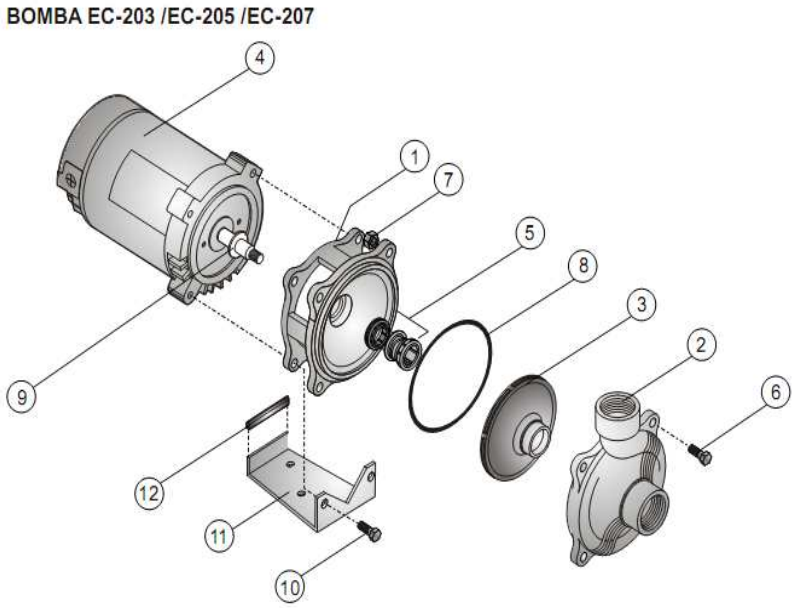
Se incluye como anexo a este documento, **Característica de la bomba, Diagrama de Moody, Especificaciones del sensor, Pérdidas en tubería, Desacoplador de señal, Artículo y Manual del Usuario**

1. BOMBAS CENTRÍFUGAS

Una bomba centrífuga es un tipo de bomba hidráulica que transforma la energía mecánica de un impulsor rotatorio llamado rodete en energía cinética y potencial requeridas. El fluido entra por el centro del rodete, que dispone de unos álabes para conducir el fluido, y por efecto de la fuerza centrífuga es impulsado hacia el exterior, donde es recogido por la carcasa o cuerpo de la bomba, que por el contorno su forma lo conduce hacia las tubería de salida o hacia el siguiente rodete (siguiente etapa).[1]

Las partes de una bomba centrífuga (figura 1) son:

Figura 1. Despiece de la bomba.



Fuente: Catálogo Barnes Barnes de Colombia s.a.

[1]http://es.wikipedia.org/wiki/Bomba_centr%C3%ADfuga

Tabla 1. Lista de piezas de la bomba.

No.	DESCRPCIÓN
1	Acople en hierro
2	Cuerpo en hierro
3	Impulsor φ 4,000"
4	Motor de 1/2 hp monofasico
5	Sello mecánico
6	Tornillo 5/16" X 1-1/4" NC
7	Tuerca de 5/16" NC
8	Anillo "O"
9	Arandela de caucho
10	Tornillo 3/8" X 3/4" NC
11	Base en lamina
12	Empaque de caucho

Fuente: Catálogo Barnes.

Los elementos de que consta una instalación de bombeo son: [2]

a) Una tubería de aspiración, que concluye prácticamente en la brida de aspiración, o en muchos casos una conexión roscada.

b) El impulsor o rodete, formado por un conjunto de álabes que pueden adoptar diversas formas, según la misión a que vaya a ser destinada la bomba, los cuales giran dentro de una carcasa circular. El rodete es accionado por un motor, y va unido solidariamente al eje, siendo la parte móvil de la bomba.

El líquido penetra axialmente por la tubería de aspiración hasta la entrada del rodete, experimentando un cambio de dirección más o menos brusco, pasando a radial, (en las centrífugas), o permaneciendo axial, (en las axiales), acelerándose y absorbiendo un trabajo.

[2] http://www.scribd.com/doc/6057846/Bombas-Centrífugas

Los álabes del rodete someten a las partículas de líquido a un movimiento de rotación muy rápido, siendo proyectadas hacia el exterior por la fuerza centrífuga, creando una altura dinámica de forma que abandonan el rodete hacia la voluta a gran velocidad, aumentando también su presión en el impulsor según la distancia al eje. La elevación del líquido se produce por la reacción entre éste y el rodete sometido al movimiento de rotación.

c) La voluta es un órgano fijo que está dispuesta en forma de caracol alrededor del rodete, a su salida, de tal manera que la separación entre ella y el rodete es mínima en la parte superior, y va aumentando hasta que las partículas líquidas se encuentran frente a la abertura de impulsión. Su misión es la de recoger el líquido que abandona el rodete a gran velocidad, cambiar la dirección de su movimiento y encaminarle hacia la brida de impulsión de la bomba.

La voluta es también un transformador de energía, ya que frena la velocidad del líquido, transformando parte de la energía dinámica creada en el rodete en energía de presión, que crece a medida que el espacio entre el rodete y la carcasa aumenta, presión que se suma a la alcanzada por el líquido en el rodete.

En algunas bombas existe, a la salida del rodete, una corona directriz de álabes que guía el líquido antes de introducirlo en la voluta.

d) Una tubería de impulsión, instalada a la salida de la voluta, por la que el líquido es evacuado a la presión y velocidad creadas en la bomba.
Estos son, en general, los componentes de una bomba centrífuga aunque existen distintos tipos y variantes. La estructura de las bombas centrífugas es análoga a la de las turbinas hidráulicas, salvo que el proceso energético es inverso; en las turbinas se aprovecha la altura de un salto hidráulico para generar una velocidad de rotación en la rueda, mientras que en las bombas centrífugas la velocidad

comunicada por el rodete al líquido se transforma, en parte, en presión, lográndose así su desplazamiento y posterior elevación.

1.1 NET POSITIVE SUCTION HEAD (NSPH)

El término más común para describir las condiciones de succión de una bomba, es la carga neta de succión positiva (NSPH), definida por la Hydraulic Institute U.S.A., para las condiciones de succión en la bomba y la presión de vapor líquido expresada en términos de carga.[3]

$$NSPH = \frac{P}{g} + \frac{V^2}{2g} - H(vapor)$$

Donde P es la presión absoluta en la entrada de la bomba y V es la velocidad promedio en el ducto de succión. [4]

Es conveniente diferenciar el NSPH requerido del disponible. El primero se refiere a las condiciones de succión necesarias para el funcionamiento correcto de la máquina sin cavitación, mientras el segundo expresa la forma como la instalación opera.

Existe para cada caudal una presión mínima en la boca de aspiración por encima de la tensión de vapor en que, para valores inferiores, la bomba cavitara. Esta presión se expresa en metros de columna e líquido y es lo que se denomina NSPH requerido por la bomba, para distinguirlo del NSPH disponible.

El NSPH requerido es la diferencia expresada en metros de líquido entre la presión en boca de aspiración de la bomba y la tensión de vapor del fluido al cual

[3] Curso de turbo- máquinas hidráulicas, Ing. Nestor Raul D´croz

la bomba empieza a cavitar. Para evitar la cavitación el NSPH de la línea debe ser superior al de la bomba.

Concluyendo se tiene:

NPSH requerida: es la NPSH mínima que se necesita para evitar la cavitación. Depende de las características de la bomba, por lo que es un dato que debe proporcionar el fabricante en sus curvas de operación.

NPSH disponible: depende de las características de la instalación y del líquido a bombear.

$$NPSHd = \frac{P}{\gamma} - z - Hp - Hvapor$$

Donde:

γ es la gravedad específica del líquido (adimensional).

P es la presión en el nivel de aspiración

z es la altura geométrica de aspiración en metros.

Hp es la pérdida de carga en la línea de aspiración, en metros.

Hvapor es la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo

1.2 CAVITACIÓN EN BOMBAS CENTRÍFUGAS

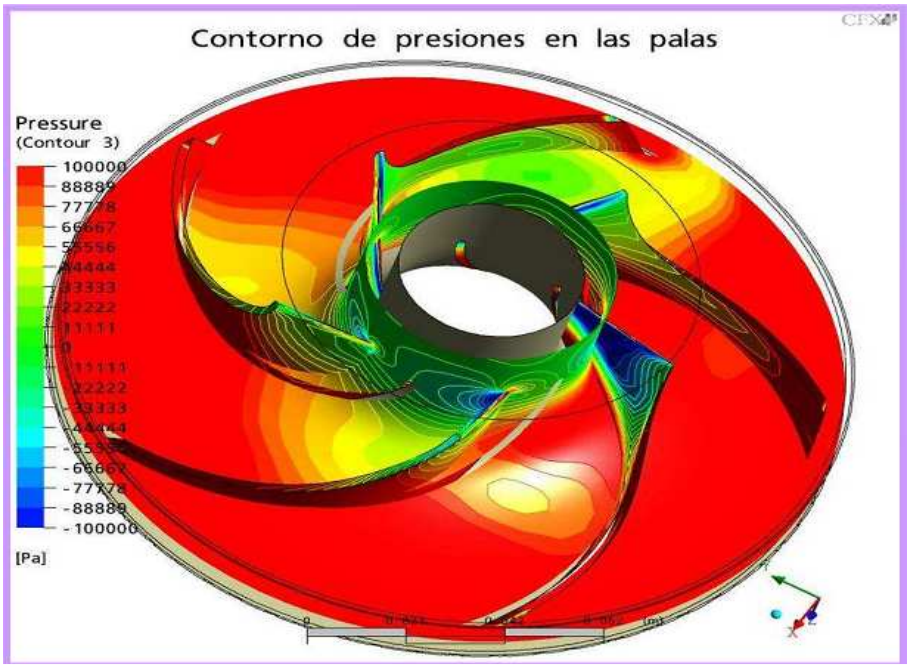
Por cavitación se entiende la formación de bolsas localizadas de vapor dentro del líquido, pero casi siempre en las proximidades de las superficies sólidas que limitan el líquido.

Supongamos que en un tramo del álabe, debido a pérdida de carga, la presión es inferior a la presión de vapor del líquido, se formará una bolsa de vapor. Esta bolsa, en su recorrido por el álabe, llegará a una zona de presión superior a la tensión de vapor. Instantáneamente toda la fase de vapor pasará a liquida.

El Volumen que ocupaba aquella bolsa de vapor será ocupado por el líquido en forma violenta. Esto es traducirá en un golpeteo sobre el álabe que lo erosiona. Este esfuerzo intermitente a través del eje se ejercerá sobre los cojinetes, así como sobre los cierres mecánicos. Si se permite funcionar la bomba en estas condiciones durante cierto tiempo, puede llegar a destruir todos sus órganos principales.

En la figura 2, se observa la distribución de esfuerzos generados por la presión en el rodete de la bomba.

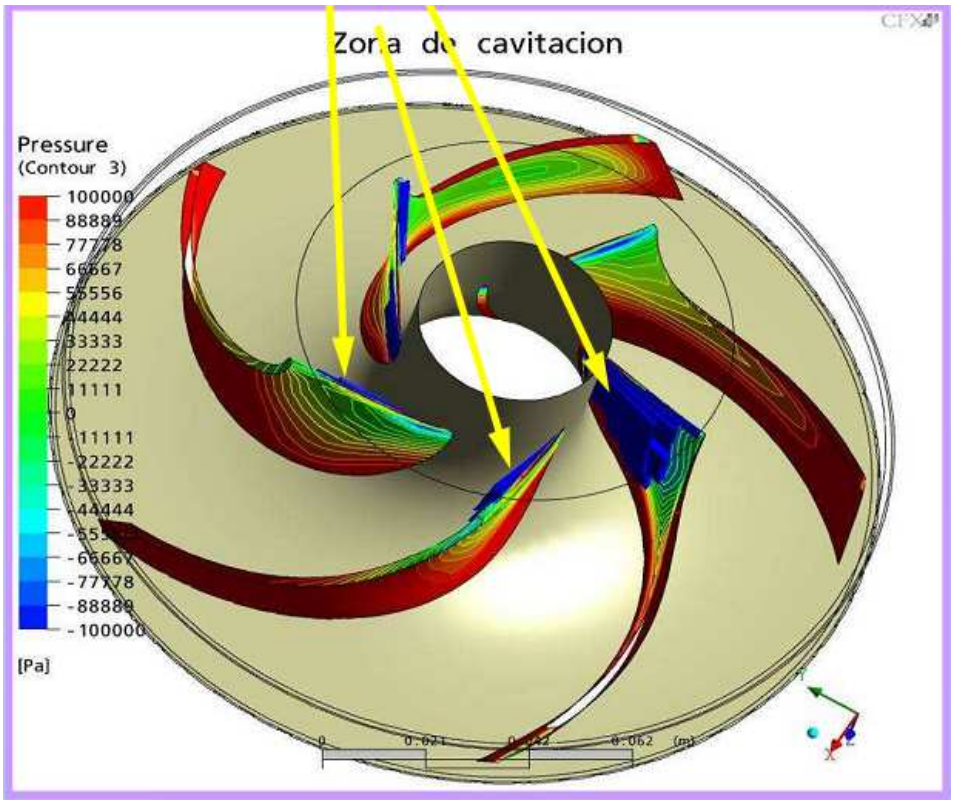
Figura 2. Distribución de presiones en los álabes del rodete.



Fuente: ADSC bombas & ventiladores

En contraste con la ebullición, la cual puede ser causada por la introducción de calor o por una reducción de la presión estática ambiente del líquido, la CAVITACIÓN es una vaporización local del líquido, inducido por una reducción hidrodinámica de la presión. (Figura 3).

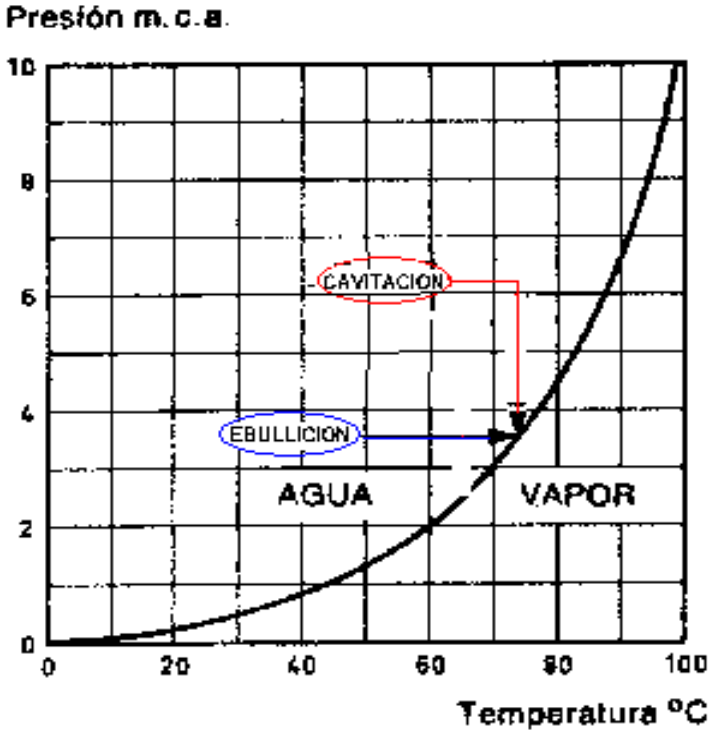
Figura 3. Zona de cavitación en los álabes.



Fuente: ADSC bombas & ventiladores

Aunque el fenómeno de la cavitación aún es tema de estudio en los investigadores, se han realizado pruebas en líquidos sometiéndolos a esfuerzos de tensión en donde han soportado esfuerzos de tensión de hasta 34 atmósferas en pruebas de laboratorio bajo condiciones muy controladas.

Figura 4. Comparación entre ebullición y cavitación.



Fuente: http://fain.uncoma.edu.ar/centraleshidraulicas

En la naturaleza el mercurio es uno de los metales líquidos más excepcionales debido entre otras cosas a su punto de evaporización en 20 ºC ocurre a 0.168 Pa, debido a esto es que es muy aplicado en la instrumentación porque su punto de vaporización está muy bajo, comparado con el del agua el cual ocurre en la misma temperatura a 2337 Pa, sin embargo por ser este último, el fluido más común vale la pena realizar un análisis de las condiciones de trabajo de este con el fin de evitar en las bombas una presión menor a la de vaporización.

Tabla 2. Tensión superficial y presión de vapor del agua.

T (ºC)	N / m3	KPa
0	0.0756	0.6110
10	0.0742	1.1270
20	0.0728	2.3370
30	0.0712	4.0242
40	0.0696	7.3750
50	0.0679	12.340
60	0.0662	19.920
70	0.0644	31.160
80	0.0626	47.350
90	0.0608	70.110
100	0.0589	101.33

Fuente: Pequeñas centrales hidráulicas.

1.2.1 Coeficiente de cavitación Thoma.

Se define por coeficiente de cavitación de THOMA, como la relación entre el NPSHr y la altura manométrica máxima Hman(máx.) correspondiente al rendimiento manométrico máximo:

Se define el coeficiente σ de cavitación de Thoma:

$$\sigma = \frac{hsv}{H}$$

Donde:

hsv=NSPH del punto de máximo rendimiento

H= altura de elevación de la bomba a máximo rendimiento

Este coeficiente es muy útil a la hora de predecir la posibilidad de cavitación. Experimentalmente se ha visto que existe una relación entre el coeficiente σ y la velocidad específica de aspiración.

Para un valor determinado de velocidad específica mientras mayor sea σmás protegida estará la bomba contra la cavitación.

1.2.2 Tipos de cavitación.

Por lo dicho precedentemente hay dos tipos de cavitación, uno con flujo y otro estando el líquido estático: (a) Cavitación por flujo y (b) Cavitación por ondas

Ejemplos del tipo (a) se presenta en tuberías donde la presión estática del líquido alcanza valores próximos al de la presión de vapor del mismo, tal como puede ocurrir en la garganta de un tubo venturi, a la entrada del rodete de una bomba centrífuga o a la salida del rodete de una turbina hidráulica de reacción.

Los ejemplos del tipo (b) se presenta cuando estando el líquido en reposo, por él se propagan ondas, como las ultrasónicas denominándose Cavitación Acústica, o típicas ondas por reflexión sobre paredes o superficies libres debido a ondas de compresión o expansión fruto de explosiones y otras perturbaciones como en el caso del golpe de ariete, denominadas Cavitación por Shock

1.2.3 Implosión de la burbuja.

La bolsa, ya aumentada de tamaño, es arrastrada a una región de mayor presión y finalmente estalla, es decir, IMPLOTA. Esta acción periódica está generalmente asociada a un fuerte ruido crepitante.

El aumento de tamaño de las burbujas o bolsas reduce los pasajes aumentando así la velocidad de escurrimiento y disminuyendo por lo tanto más la presión. Tan pronto como la presión en la corriente supera la tensión de vapor después de pasar la sección más estrecha, se produce la condensación y el colapso de la burbuja de vapor. La condensación tiene lugar instantáneamente. El agua que rodea a las burbujas que implotan golpean entonces las paredes u otras partes del fluido, sin amortiguación alguna.

Teniendo en cuenta la condensación del vapor, con distribución espacial uniforme y ocurriendo en un tiempo muy corto, puede ser tomado por cierto que las burbujas no colapsan concéntricamente.

Se ha analizado el desarrollo de una burbuja en la vecindad de una pared, teóricamente, y calculado el tiempo de implosión y la presión demostrándose que la tensión superficial acelera la implosión y aumenta los efectos de la presión.
Muchos efectos trae aparejado el colapso de la burbuja, relacionados con los diferentes parámetros tales como la influencia del gradiente de presión, la deformación inicial en la forma de la burbuja, velocidad del fluido en la vecindad de los límites sólidos, etc.

1.2.4 Daño por cavitación.

Un daño por cavitación tiene un aspecto semejante a picaduras por corrosión, pero las zonas dañadas son más compactas y la superficie es más irregular en el caso de la cavitación. El daño por cavitación se atribuye parcialmente a efectos de desgaste mecánico. La corrosión interviene cuando el colapso de la burbuja destruye la película protectora, como se muestra esquemáticamente en la figura 5, con los pasos siguientes:

- Se forma una burbuja de cavilación sobre la película protectora.

- El colapso de la burbuja causa la destrucción local de la película.

- La superficie no protegida del metal está expuesta al medio corrosivo y se forma una nueva película por medio de una reacción de corrosión.

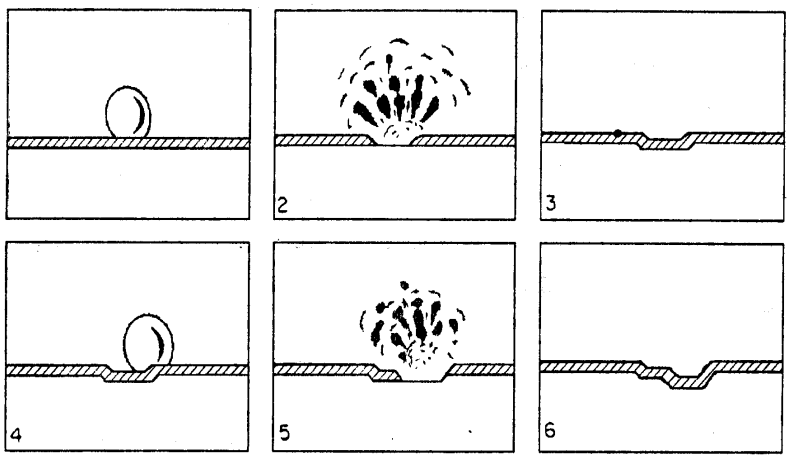
- Se forma una nueva burbuja en el mismo lugar, debido al aumento de poder nucleante de la superficie irregular.

- El colapso de la nueva burbuja destruye otra vez la película.

- La película se forma de nuevo y el proceso se repite indefinidamente hasta formar huecos bastante profundos.

El mecanismo anterior también funciona sin la presencia de una película protectora, ya que la implosión de la burbuja es suficiente para deformar el metal plásticamente y arrancarle pedazos de material. Por esta razón se acepta generalmente que la cavitación es un fenómeno de corrosión-erosión, figura 5.

Figura 5. Erosión de la burbuja en las paredes de la bomba.

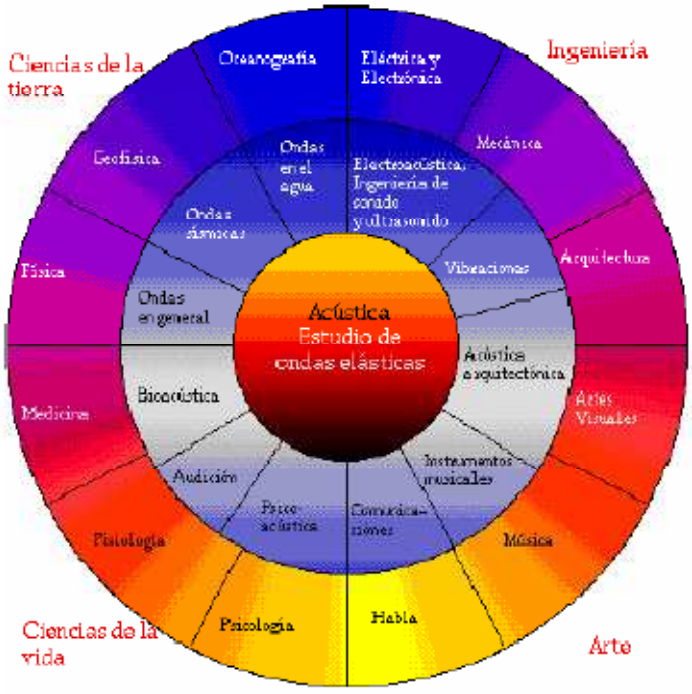


Fuente: http://images.google.com

2. EMISIONES ACÚSTICAS

La acústica es la ciencia que estudia la producción, transmisión y percepción del sonido tanto en el intervalo de la audición humana como en las frecuencias ultrasónicas e infrasónicas. Dada la variedad de situaciones donde el sonido es de gran importancia, son muchas las áreas de interés para su estudio: voz, música, grabación y reproducción de sonido, telefonía, refuerzo acústico, audiología, acústica arquitectónica, control de ruido, acústica submarina, aplicaciones médicas, etc. Por su naturaleza constituye una ciencia multidisciplinaria ya que sus aplicaciones abarcan un amplio espectro de posibilidades, tal como se observa en la figura 6.

Figura 6. Aéreas de conocimiento y de aplicación de la acústica.



Fuente: http://images.google.com

El fenómeno sonoro está acompañado por la siguiente serie de eventos:

- Determinación de un movimiento sonoro.
- La comunicación de dicho movimiento al aire o a cualquier otro intermediario interpuesto entre el cuerpo sonoro y el oído.
- La propagación de este movimiento, que pasa de una molécula a otra del cuerpo intermediario en una sucesión adecuada.
- La transmisión de dicho movimiento del medio ambiente al oído.
- La transmisión que se produce desde el oído a los nervios auditivo por determinado mecanismo.
- La producción de la sensación.

Estos puntos determinan, aún hoy, los capítulos básicos de la acústica moderna: generación, irradiación y propagación del sonido así como también su interacción con el ambiente mediante los fenómenos de absorción, reflexión o difracción del sonido, y por último su percepción.

Algunas de las áreas de trabajo en acústica son:

- Acústica arquitectónica. Estudia la interacción del sonido con las construcciones. Participa en el diseño de: Salas de conciertos, auditorios, teatros, estudios de grabación, iglesias, salas de reuniones, salones de clases, etc.

- Ingeniería acústica. Estudia el diseño y utilización de transductores e instrumentos de medición de sonido. Incluye la instrumentación para diagnóstico médico, sísmico, grabación y reproducción de voz y música. Una rama de la ingeniería acústica es la electroacústica la cual trata con micrófonos y altavoces.

- Acústica musical. Combina elementos de arte y de ciencia al incluir el diseño de instrumentos, el uso de sistemas de grabaciones, la modificación electrónica de la música con el estudio de su percepción. Su campo de trabajo está en la Industria de la grabación de música y cine, y en la Industria de la construcción de instrumentos. A esta área pertenece el llamado ingeniero de sonido.

- Control de ruido y vibraciones. Esta área cobra cada vez mayor importancia dado el aumento en el reconocimiento del ruido como un factor de contaminación que afecta seriamente la salud. Su campo de trabajo está en las fábricas, en los organismos de control gubernamental y en asesorías a los arquitectos. También tiene un campo importante en el mantenimiento preventivo de maquinarias mediante el análisis de sus vibraciones.

- Bioacústica y acústica médica. Estudia la interacción entre las ondas sonoras y los cuerpos humanos y animales. Se ha desarrollado enormemente el uso de ultrasonidos como herramienta de diagnóstico y de tratamiento.

2.1 DESCRIPCIÓN DE LAS EMISIONES ACÚSTICAS

La Emisión Acústica (EA) es la clase de fenómeno que genera ondas elásticas transitorias por la liberación rápida de energía a partir de fuentes localizadas, o las ondas transitorias generadas de este modo. Todos los materiales producen emisiones acústicas, ya sea debido a cargas mecánicas, fugas, cavitación, creación y propagación de fisuras, durante la deformación, etc. Las ondas elásticas se mueven a través del sólido hacia la superficie, donde son detectadas por los sensores. Estos sensores son transductores que convierten las ondas mecánicas en ondas eléctricas. De este modo se obtiene la información acerca de

la existencia y ubicación de posibles fuentes. Esto es similar a la sismología, donde las ondas sísmicas alcanzan las estaciones situadas en la superficie de la tierra. Luego del procesamiento de las señales, se obtiene la ubicación de los centros sísmicos.

2.1.1 Tipos de emisiones acústicas.

2.1.1.1 Infrasonido.

Se definen como las vibraciones de presión cuya frecuencia es inferior a la que el oído humano puede percibir; es decir entre 0 y 20 Hz. Pero, debido a que la mayoría de los aparatos electroacústicas utilizan una frecuencia entre 20 y 30 Hz, consideraremos también como infrasonidos a toda vibración con una frecuencia por debajo de los 30 Hz.

Dentro de la teoría de los infrasonidos se abarcan las vibraciones de los líquidos y las de los gases pero no la de los sólidos. Éstas últimas, gracias a sus aplicaciones y su problemática, se han convertido en una ciencia aparte llamada vibraciones mecánicas.

2.1.1.2 Sonidos audibles.

El espectro audible lo conforman las audiofrecuencias, es decir, toda la gama de frecuencias que pueden ser percibidas por el oído humano. Un oído sano y joven es sensible a las frecuencias comprendidas entre los 20 Hz y los 20 kHz. No obstante, este margen varía según cada persona y se altera con la edad (llamamos presbiacusia a la pérdida de audición con la edad). Este rango equivale muy aproximadamente a diez octavas completas (2^{10}=1024).

El espectro audible se puede subdividir en función de los tonos:

1. Tonos graves (frecuencias bajas, correspondientes a las 4 primeras octavas, esto es, desde los 16 Hz a los 256 Hz).
2. Tonos medios (frecuencias medias, correspondientes a las octavas quinta, sexta y séptima, esto es, de 256 Hz a 2 kHz).

3. Tonos agudos (frecuencias altas, correspondientes a las tres últimas octavas, esto es, de 2 kHz hasta poco más de 16 kHz).

2.1.1.3 Ultrasonido (o sonograma).

Se podría entonces definirse como un tren de ondas mecánicas, generalmente longitudinales, originadas por la vibración de un cuerpo elástico y propagadas por un medio material y cuya frecuencia supera la del sonido audible por el género humano: 20.000 ciclos/s (20 KHz) aproximadamente.

Los ultrasonidos, son utilizados para tanto en aplicaciones industriales (medición de distancias, caracterización interna de materiales, ensayos no destructivos y otros), como en medicina (ver por ejemplo ecografía, fisioterapia, ultrasonoterapia).

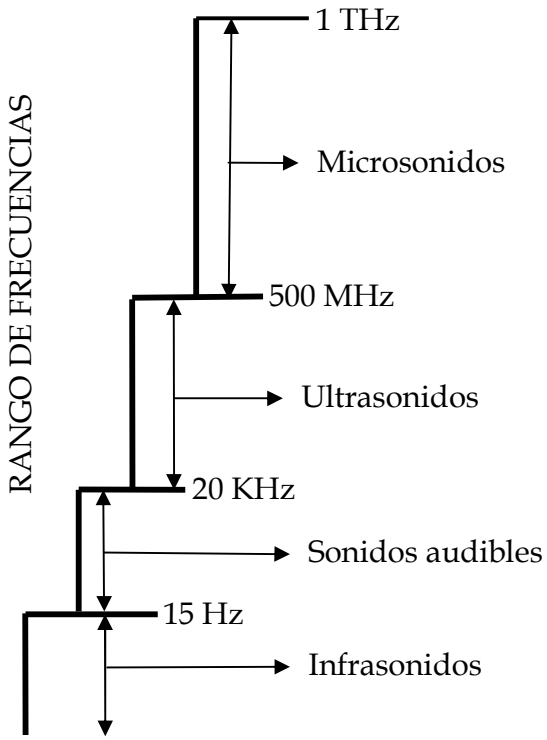
En el campo médico se les llama a equipos de ultrasonido a dispositivos tales como el doppler fetal, el cual utiliza ondas de ultrasonido de entre 2 a 3 MHz para detectar la frecuencia cardíaca fetal dentro del vientre materno.

También son utilizados como repelentes para insectos. Hay varias aplicaciones para computadoras y celulares, las cuales reproducen una onda acústica como fue explicado anteriormente, la cual molesta a los insectos, en especial a los mosquitos.

2.1.1.4 Microsonidos.

Se definen los microsonidos como las vibraciones de presión cuya frecuencia se encuentra entra 500 MHz y 1 THz.

Figura 7. Rango de frecuencias de las emisiones acústicas.



Fuente: Autores

2.2 ELECTROACÚSTICA

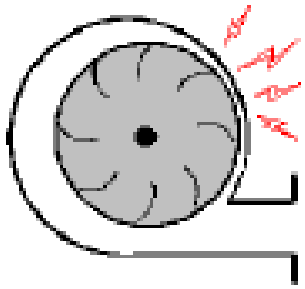
En una cadena de reproducción y grabación sonora se trabaja con señales eléctricas que representan sonidos. Estos sonidos, son variaciones de presión que tienen que ser convertidas en señales eléctricas antes de entrar en la cadena de sonido, y posteriormente al ser reproducidos, área de la ingeniería conocida como electroacústica. El primer dispositivo al que hacemos referencia es el micrófono, mientras que la conversión de la señal eléctrica a sonido se realiza con la ayuda del altavoz. Un dispositivo que realiza esta transformación, de magnitud física a una magnitud eléctrica, es lo que se denomina un transductor. Los transductores

electroacústicos más típicos dentro del mundo de la audiofrecuencia son los micrófonos, que convierten ondas de presión sonora en señales eléctricas y los altavoces, que convierten señales eléctricas en ondas de presión sonora.

2.3 EMISIONES ACÚSTICAS GENERADAS POR LA CAVITACIÓN

Las bombas centrífugas siempre tienen un componente de vibración importante en la frecuencia de paso de álabes, que es igual al número de álabes de la impulsora por las RPM. Si la amplitud se incrementa de manera significativa, eso por lo general quiere decir que hay un problema interno como una desalineación, o daño en los álabes, o cavitación. Los armónicos del paso de álabes también son comunes en estas bombas.[4]

Figura 8. Localización del ruido ocasionado por diferentes factores.



Fuente:http://www.dliengineering.com/vibman-spanish/bombascentrfugas.htm

Las Emisiones Acústicas, son un fenómeno relacionado con esfuerzos. En orden de detectar las discontinuidades y daños en los equipos, la técnica debe aplicarse cuando el equipo es esforzado. El no puede detectar problemas en áreas donde no hay estructuras sobre esforzadas. En efecto para que una inspección de Emisión Acústica sea exitosa se debe tener cuidado para esforzar la estructura.

[4] http://www.tecnomundoonline.com/index.php/los-institutos/mecanicos

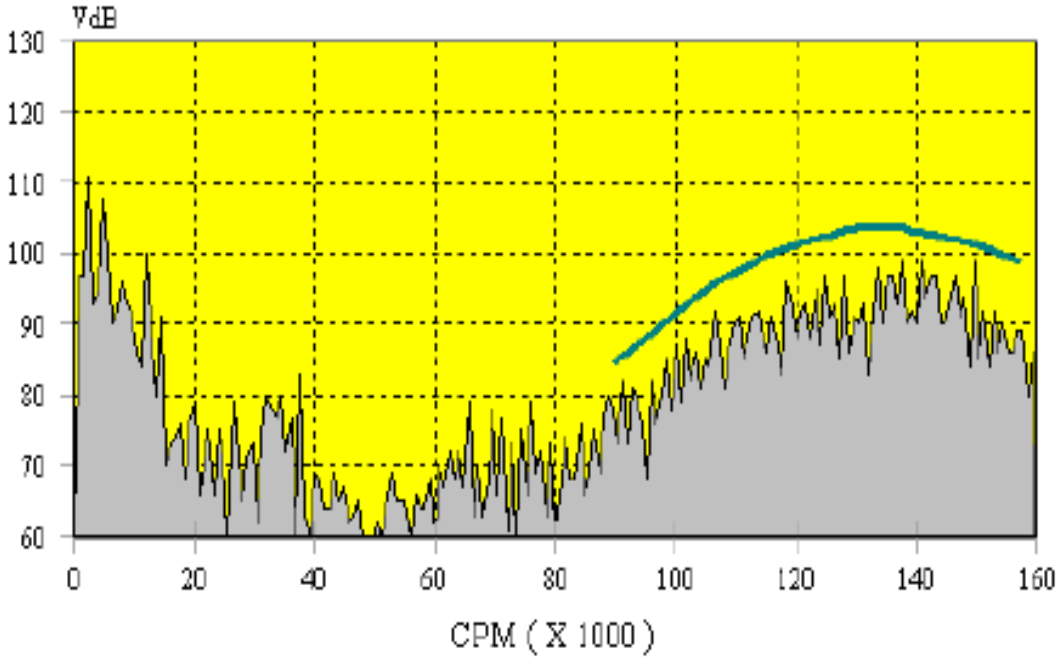
La concentración de esfuerzos creada por los defectos, producirá una cedencia de esfuerzos localizada, que es detectada por los sensores. Como cada tipo de defectos tiene un factor de concentración de esfuerzos diferentes asociados a ellos, algunos emitirán emisiones acústicas a niveles más bajos que otros, entonces, son más fácil es de detectarlos.

Las ventajas de las EMISIONES ACÚSTICAS como herramienta clave para monitorear una máquina rotodinámica para localizar zonas de alta actividad de energía asociadas a fallas que sólo se pueden detectar en línea:

- Detecta fallas que sólo se manifiestan con el equipo energizado y en situaciones de alta o baja carga.
- Se pueden filtrar ruidos ambiente y normales de operación
- Se obtiene la posición de la falla
- Se pueden analizar unidades críticas que requieran un monitoreo continuo.
- Se puede determinar la intensidad de la falla y su tendencia

El espectro de la figura 9, es un ejemplo de ruido de alta frecuencia de banda ancha indica que ocurre una falla cavitación debido a una baja presión de entrada.

Figura 9. Espectro acústico de una bomba con cavitación.

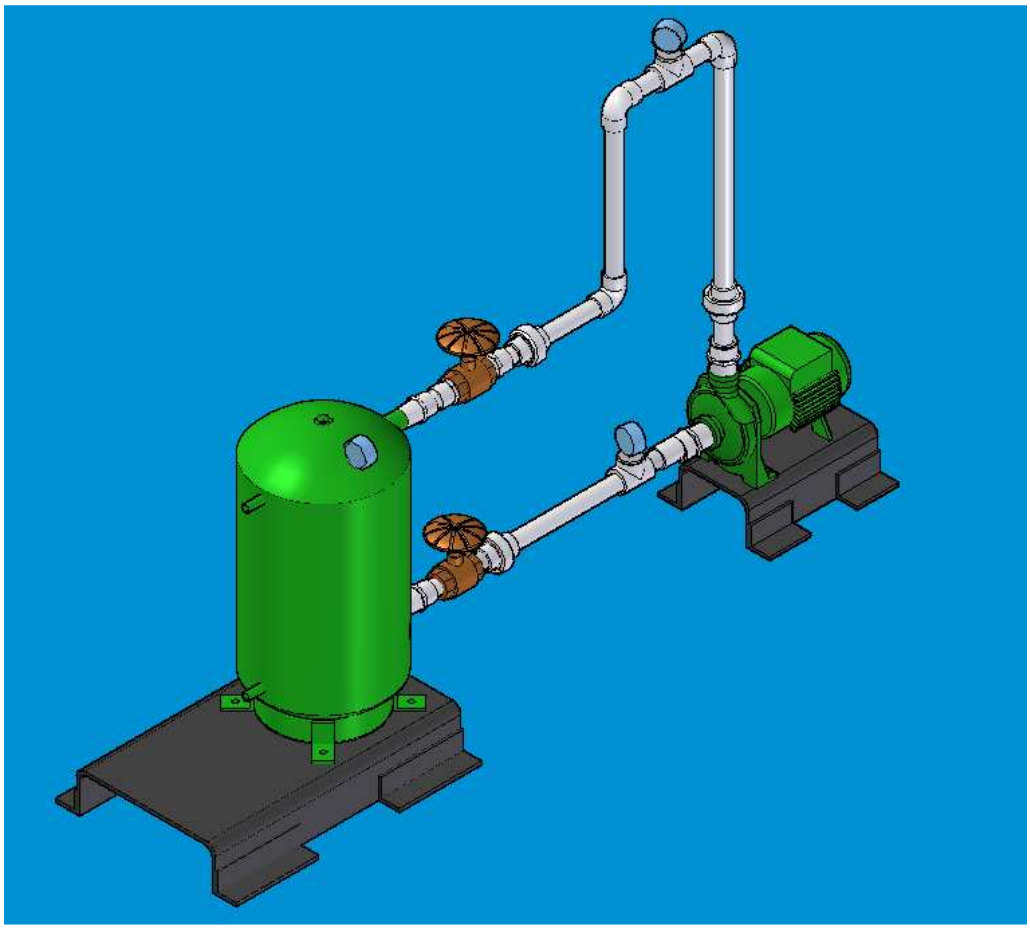


Fuente: http://www.dliengineering.com/vibman-spanish/bombascentrfugas.htm

3. DISEÑO DEL BANCO DE ENSAYO

3.1 ESQUEMA DEL BANCO DE ENSAYO

Figura 10. Esquema del Banco de Ensayo de Cavitación.



Fuente: Autores

En la Figura 10 se ilustra el esquema correspondiente al banco de ensayo que se está diseñando. Este banco está compuesto por:

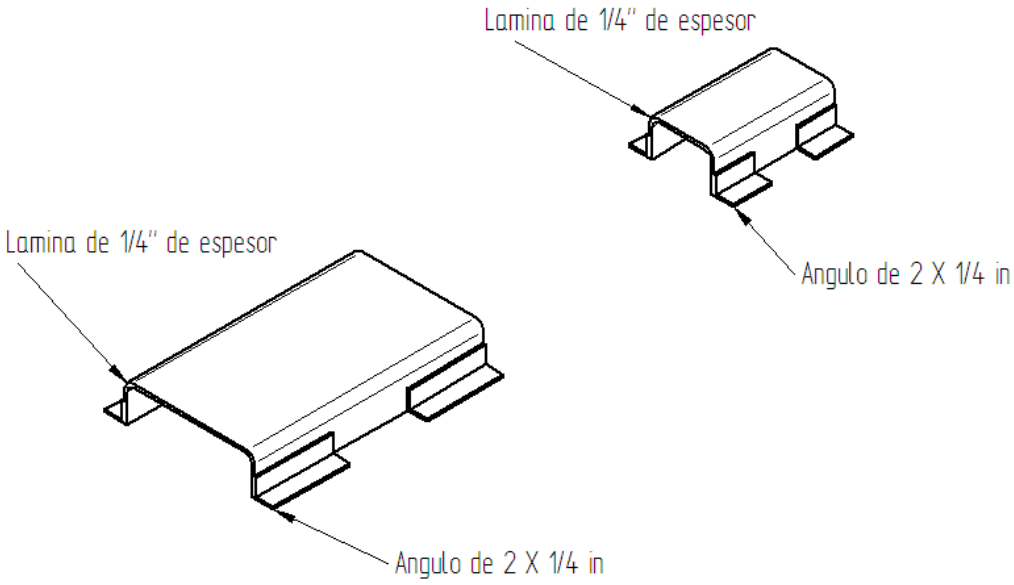
1. Base.

2. Bomba.
3. Depósito.
4. Sistema de tuberías.
5. Bomba de vació

3.1.1 Base.

La base está diseñada con 2 laminas de ¼" en acero, cuyas dimensiones son de 37 X 32cm y 60 X 60cm dobladas a 10 cm por dos lados de forma paralela en cada una, como se muestra en la figura 11, su función es la de soportar la bomba y el depósito, incluyendo todo el sistema de tuberías del banco de ensayo. Principalmente esta base se compone de dos partes, la primera es el soporte de la bomba, la segunda es el soporte del depósito y bomba de vacío. Todas estas partes están unidas entre sí con tornillería, pintadas con anticorrosivo y pintura sintética para el acabado.

Figura 11. Esquema de la base del banco.



Fuente: Autores

.

3.1.2 Bomba Centrífuga

Figura 12. Bomba centrífuga

Fuente: Autores

Se utiliza una bomba centrífuga con las siguientes características[5]:

- De construcción monobloque fabricada en hierro fundido
- Diámetro de succión y descarga de 1-1/4”
- Impulsor cerrado fabricado en plástico de alta resistencia
- Potencia de ½ hp, marca Barnes, modelo EC - 205 (Anexo A).

[5]Catálogo Barnes Barnes de Colombia s.a.

Tabla 3. Comportamiento de la bomba.

Q (gpm)	H b(m)
0	20
5	19,5
10	19
15	18,5
20	18
25	16,5
30	15
40	11,5
50	7

Fuente: Autores

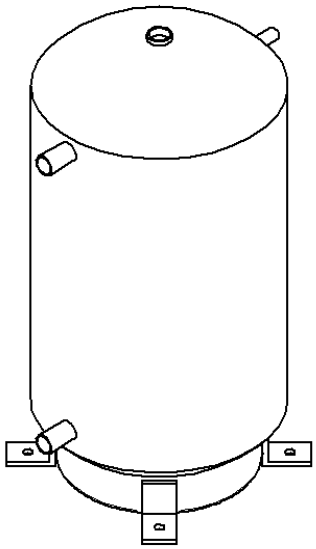
Esta bomba esta fija por pernos al soporte destinada para ella. Tanto en la aspiración como en la salida de la bomba los diámetros son de 1”1/4.

En la entrada y en la salida de la bomba, están unidos unos tramos de tuberías en las cuales van puestos los manómetros y las uniones universales que conecta la bomba a todo el sistema de tuberías.

3.1.3 Depósito.

El depósito está constituido de cinco agujeros figura 12, dos de ½” con las cuales se controla el nivel y el vaciado, uno para la descarga de 1” y otro para la succión de 1”. Por último, en la parte superior del depósito esta la conexión a la bomba de vacío el cual es una rosca de 3/8”npt.

Figura 13. Esquema del Depósito del banco.



Fuente: Autores

Figura 14. Depósito

Fuente: Autores

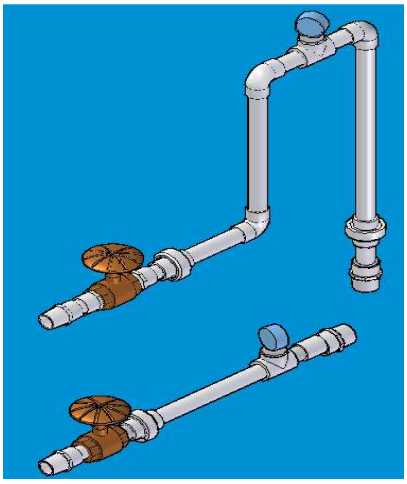
3.1.4 Sistema de tuberías.

En el proyecto se contemplo utilizar tubería de diámetro nominal de 1”de PVC de alta resistencia, figura 15 y figura 16.

Este sistema, en la salida del depósito, se tiene una válvula de bola, seguida por tramo de tubería recta hacia la succión de la bomba centrífuga, en la descarga se tiene un tramo recto de tubería seguido por una curva antes que antecede a la válvula de globo, figura 15 y figura 16, puesto que por razones constructivas la entrada al depósito debe situarse por debajo del nivel de agua, para que no se formen burbujas ni salpicaduras que entorpezcan el funcionamiento de la bomba centrífuga y la bomba de vacío, de esta forma no se alteran los valores a medir.
Esta curva se logra instalando un codo de 90°, un tramo de tubería y otro codo similar.

La altura de la salida del depósito debe estar lo más bajo posible, siempre teniendo en consideración que esta altura debe coincidir con la altura de entrada de la bomba.

Figura 15. Esquema del Sistema de tuberías



Fuente: Autores

Figura 16. Sistema de tuberia en el banco

Fuente: Autores

3.1.5 Bomba de vacío.

Para ello se utilizó una unidad compresora de ½ hp, encontrada en el laboratorio de transferencia de calor en la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, figura 17.

Figura 17. Unidad compresora utilizada como bomba de vacío.

Fuente: Autores

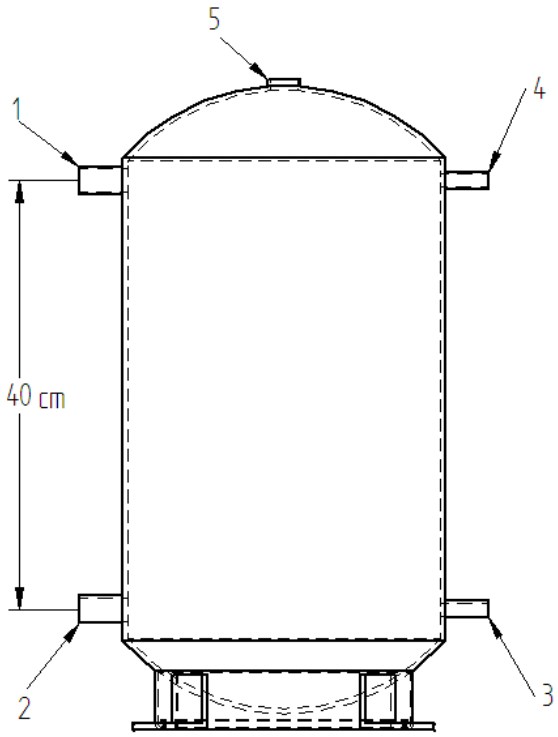
Esta unidad se probó y se modificó sus puertos de conexión para generar vació en el depósito logrando disminuir la presión de succión de la bomba centrífuga por debajo de la presión de vapor del agua en este caso.

3.2 CÁLCULOS DE DISEÑO

Están orientados a demostrar que el sistema del banco de ensayo funciona correctamente en condiciones normales y que la base puede soportar toda la estructura del banco de ensayo.

3.2.1. Sistema hidráulico

Figura 18. Nivel de agua del depósito.



Fuente: Autores

1 y 2 puerto de succión y descarga de la bomba, 3 y 4 puerto de vaciado y llenado del depósito, puerto5 de conexión bomba de vacío.

Como se muestra en la figura 18 la cota máxima del nivel de llenado se pretende que esté a 400 mm del fondo del depósito.

La bomba, en condiciones normales, funcionará en un circuito cerrado cuyo puerto de aspiración y puerto de descarga están abiertos a la atmósfera, puesto que la conexión a la bomba de vacío del depósito estará abierta. La ecuación de la energía tendrá como punto inicial el punto 1 y punto final será el punto 2, los cuales, por facilidad de cálculo, se encuentran en la superficie del agua del depósito. Por lo tanto la ecuación de la energía queda:

$$H1 = H2 + h(1-2) - Hbb \quad \text{Ecu. 1}$$

Donde H1 es la energía (altura de carga) disponible en el punto 1, H2 es la energía disponible en el punto 2, h1-2 es la pérdida del sistema de tuberías y Hbb es la altura de carga entregada por la bomba.

Al desglosar la Ecu. 1, queda de la manera siguiente:

$$\frac{P1}{Y} + Z1 + \frac{V1^2}{2g} = \frac{P2}{Y} + Z2 + \frac{V2^2}{2g} + \frac{f}{2g}\left[V2^2\left(\frac{L(tsist)+\sum L(tequivalente)}{D}\right)\right] - Hbb$$

Ecu.2

Pero como ambos puntos se encuentran a la misma altura Z1 - Z2 = 0, además están abierto a la atmósfera, entonces P1 = P2 = 0. Por último despreciando la energía cinética del nivel del depósito $\frac{V1^2}{2g} \approx \frac{V2^2}{2g} = 0$, por lo tanto de la Ecu. 2, se tiene:

$$Hbb = \frac{f}{2g}\left[V2^2\left(\frac{L(tsist) + \sum L(tequivalente)}{D}\right)\right] \quad \text{Ecu. 3}$$

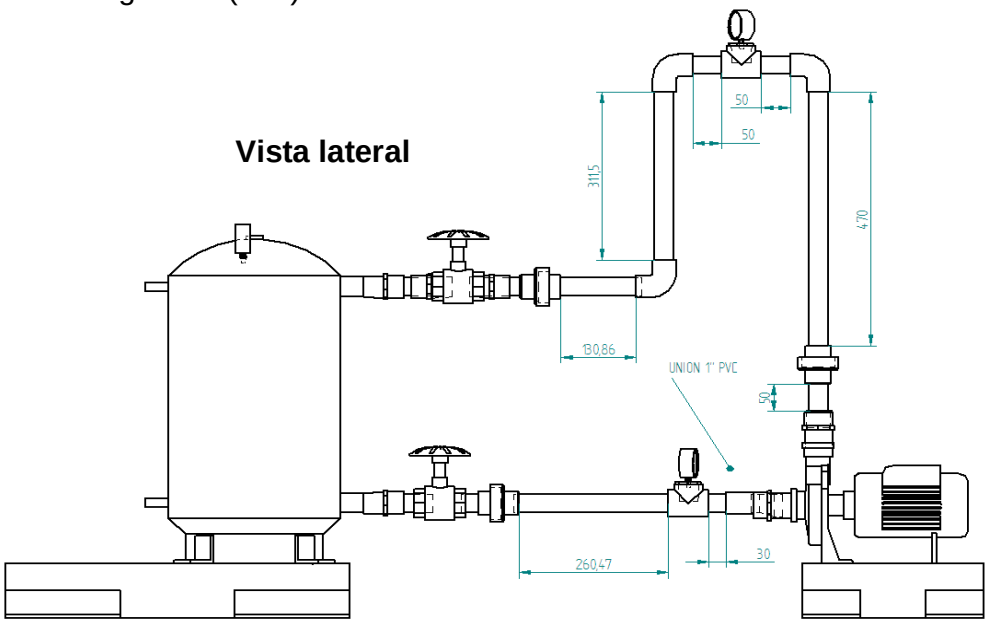
De acuerdo a la figura 20 la sumatoria de longitudes de tubería, tanto del sistema de tuberías como la de los accesorios, en metros, quedaría de la siguiente forma:

Ltot. sist. = 1.44 m

Figura 19. Banco de cavitación

Fuente: Autores

Figura 20. Longitudes (mm) de los tramos del sistema de Tuberías



Fuente: Autores

La sumatoria de longitudes equivalentes (Lequi) va referida a los accesorios del sistema de tuberías, es decir, válvulas, codos, etc. Luego para el sistema de tuberías representado en la figura 20,y utilizando la tabla de valores del anexo E, se tiene:

- Entrada común: Lequi = 2m; cantidad de entradas: 1.

- Válvula de bola: Lequi = 0.366m; cantidad de válvulas de bola: 3.

- Codo curva brusca: Lequi = 2.042m; cantidad de codos curva brusca: 3.

- Unión universal: Lequi = 0.25m; cantidad de uniones universales: 3.

- Tee: Lequi = 1.432m; cantidad de T: 2

- Válvula de globo: Lequi = 4m; cantidad de válvulas de globo: 1

- Salida: Lequi=0.5m; cantidad de salidas: 1

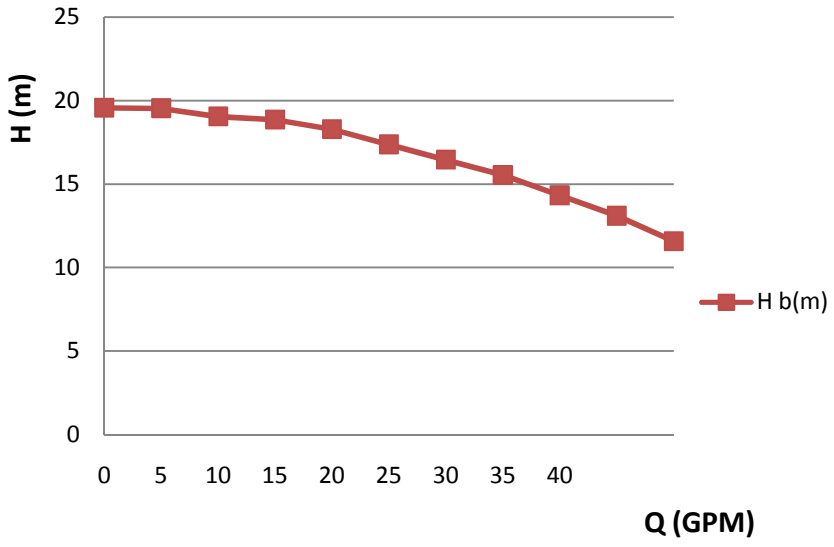
Por lo tanto, la sumatoria longitudes equivalentes en el sistema de tuberías ytramo de la placa orificio quedaría de la siguiente forma:

ΣLequi.sist. = 2 + 3 • 0.366 + 3 • 2.042 + 3 • 0.25 + 2•1.432+4+0.5 (m).

Ahora para obtener el término izquierdo de la ecu. 3, se utiliza la tabla 2 que describe el comportamiento de la bomba, figura 21. Y con ayuda de MICROSOFT EXCEL se calcula la ecuación de la bomba.

$$Hbb = -0.27Q^2 + 1.315Q + 18.23$$ Ecu. 4, ecuación de la bomba

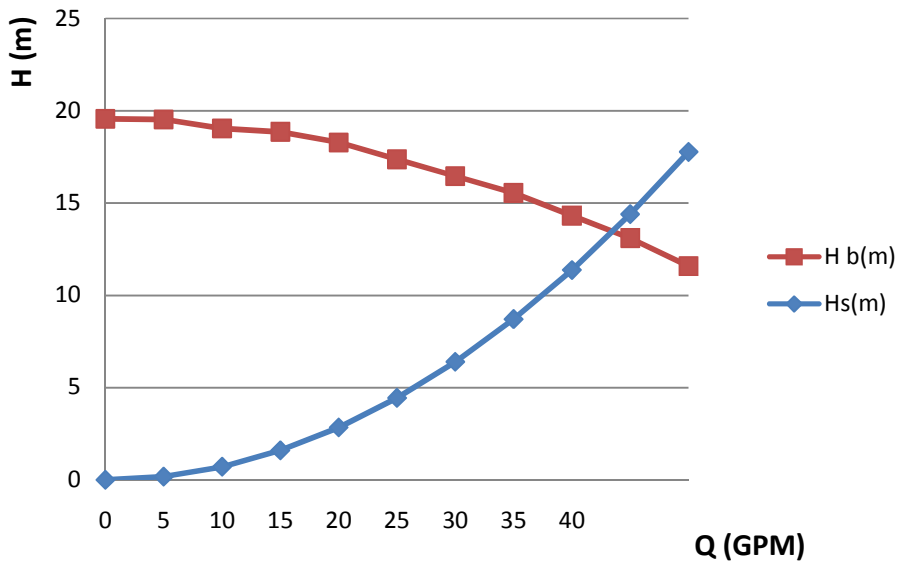
Figura 21.Curva de la bomba de Q vs Hbb



Fuente: Autores

Por el tipo de problema de sistema de tubería, no tiene solución directa. Por lo tanto, la única forma de resolverlo es mediante la iteración, se hace apoyo en el diagrama de Moody, la ecuación de Coolebrook y Excel para obtener la curva del sistema y el punto de corte de las dos curvas que describen el punto de operación figura 22, el cual garantiza que, para estas condiciones de servicio, la bomba funciona perfectamente.

Figura 22.Punto de corte entre la curva de la bomba y la del sistema.



Fuente: Autores

Tabla 4. Datos obtenidos en el diseño hidráulico

DIAMETRO	0,0254	m	E/D	5,9055E-05	
VISCOSIDAD	1,01E-06	m²/s	L(sistema)	3,3	m
GRAVEDAD	9,81	m/s²	L(equi)	16,356	m
E	1,50E-06	m	L	19,656	m
A	0,00050671	m²			

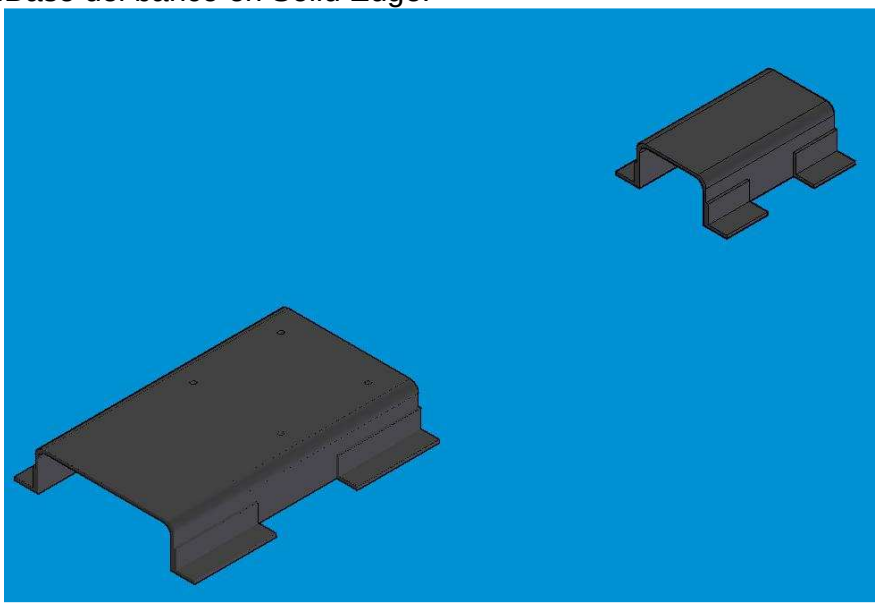
V (m/s)	Re	f	hf (m)	V(m/s)	error = 1	Q (m³/h)
1	2,52E+04	0,028	1,10E+00	1,058782769	9,44E-01	*1,82414692*
1,2	3,03E+04	0,027	1,53E+00	0,02338163	1,15E+00	*2,18897631*
1,25	3,15E+04	0,0265	1,63E+00	0,023159772	1,14E+00	*2,28018366*
	0,00E+00		0,00E+00	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	*0*
	0,00E+00		0,00E+00	#¡DIV/0!	#¡DIV/0!	*0*

Fuente: Autores

3.2.2. Diseño de la base.

El diseño de la base del banco está diseñada en dos partes por separado, con el fin de no tener restricciones en el circuito hidráulico relacionado con la longitud, si a este se le desea agregar o quitar elementos, de tal forma que siendo las bases independientes se pueden acercar o alejar libremente la una con respecto a la otra.

Figura 23.Base del banco en Solid Edge.



Fuente: Autores

Para su construcción se utilizó una lámina de ¼” de espesor a la cual se doblaron por los lados más largos, con el fin de mantener una altura de 10 cm con respecto a la mesa del laboratorio de vibraciones, figura 23.

Este tipo de base es semejante a las vigas de perfiles en “C” (chanel o viga canal), debido a que con las dimensiones requeridas este tipo de perfil no se consiguió se opto por esta fabricación.

Además se le soldaron cuatro tramos de Angulo de 2” X ¼” (dos a cada lado) para aumentar tu estabilidad. La estructura en “C” más grande se le agregó cuatro refuerzos para evitar torceduras al a hora de soldar los tramos de ángulos, y también para ayudar a la deformación por la carga.

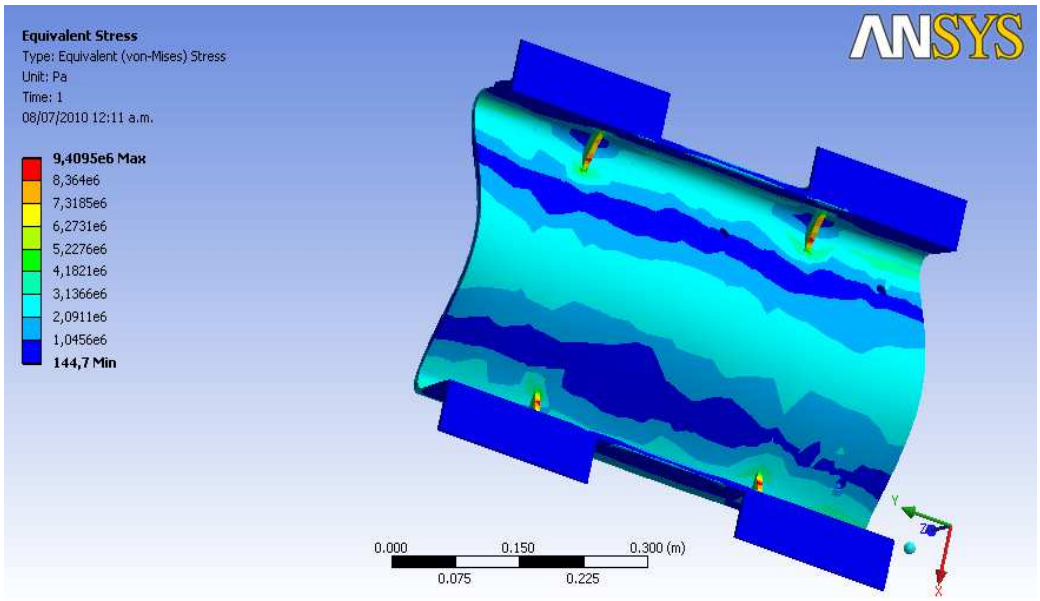
Para tener seguridad se realizo un análisis en ANSYS el cual se muestra a continuación.

En el entorno de simulación y por medio del análisis estructural se procede agregar las cargas por medio de componentes, para la base grande se aplica una fuerza de 1500 N equivalente a 152.749 kg, y a la base pequeña se le aplica una fuerza de 200N equivalente a 20.366 kg.

Ya realizado lo anterior verificamos que el material sea acero estructural y procedemos a realizar la solución, la cual muestra los siguientes resultados:

Se presenta un esfuerzo equivalente máximo igual a 9.4095e6 Pa, ubicado en los refuerzos de la base grande como se muestra en la figura 24.

Figura 24.Esfuerzo equivalente base grande

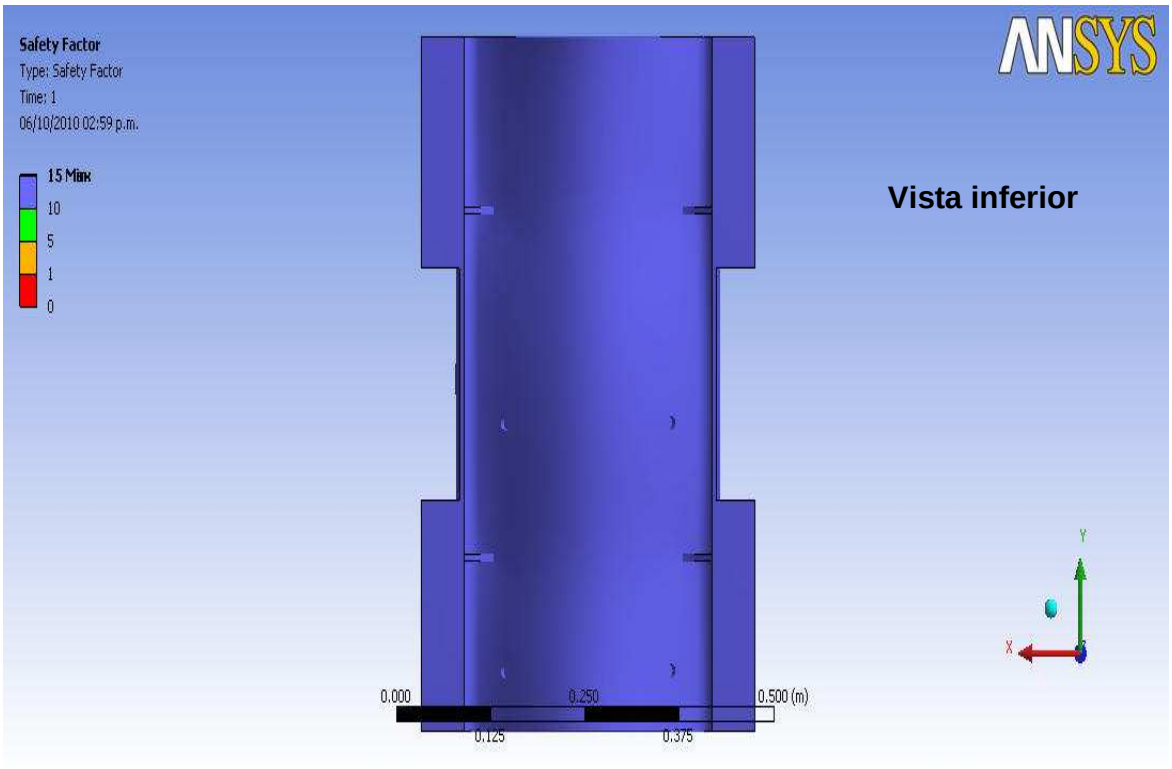


Fuente: Autores

Ahora para tener seguridad que la estructura soportara la carga sin problema, se analisa el factor de seguridad el cual como minimo debe ser mayor o igual a 1. Comose puede observar en las figura25, se tiene una factor de seguridad igual a

15, lo cual indica que esta base es más que resistente y cumple con el requisito de perdurabilidad para el banco.

Figura 25. Factor de seguridad de la base.



Fuente: Autores

4. OBTENCION Y MANEJO DE LA SEÑAL.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL SENSOR.

Figura26. Sensor acústico WDIU-AST

Fuente: Autores

Un sensor de emisión acústica convierte la energía mecánica transportada por la onda elástica en una señal eléctrica, el sensor más correctamente se llama un transductor. El transductor más utilizado en EA es el transductor piezoeléctrico. Esta elección ha sido escogida por la facilidad de fabricación, su alta sensibilidad, y una robustez que permite su utilización en aplicaciones industriales.

El elemento activo de un transductor piezoeléctrico es un disco delgado de material piezoeléctrico (un material que puede convertir la deformación mecánica

en voltaje eléctrico). Este disco es metalizado por ambas caras para los contactos eléctricos y montado en un cilindro de metal para proporcionar protección a la interferencia electromagnética. Los piezoeléctricos de cerámica más comunes en los transductores EA están hechos de pequeños cristales de titanatos y zirconates que se mezclan con otros materiales, se moldean a la forma deseada, y cocina en un horno.

Para aprovechar la alta sensibilidad del transductor piezoeléctrico, se debe garantizar que la energía acústica pase al transductor con una pérdida mínima entre el objeto en observación y el transductor. Esto se logra por medio de capas finas de grasa, aceite o el adhesivo epoxi entre el transductor y el objeto en observación[6].

4.2 TRANSFERENCIA DE LAS EMISIONES ACÚSTICAS

Cuando un sensor simplemente se ha colocado en la superficie del objeto de estudio, se encuentra que el sensor produce una señal muy débil. Si una capa delgada de un líquido se coloca entre el sensor y la superficie del objeto, se obtiene una señal mucho más fuerte. El uso de algún tipo de acoplador es casi imprescindible para la detección de señales de bajo nivel acústico. Físicamente, esto se explica al observar la onda acústica como onda de presión transmitida a través de dos superficies en contacto. En una escala microscópica de las superficies del sensor y el objeto son muy ásperas, sólo algunos puntos se tocan cuando están en contacto. Si los espacios microscópicos están llenos de un fluido, la presión será transmitida de manera uniforme entre las superficies[7].

[6] AE Sensors & Preamplifiers Users Manual.
[7] AE Sensors & Preamplifiers Users Manual.

4.2.1 Acoplador.

Un acoplador es cualquier material que facilita la transmisión de las ondas acústicas entre dos superficies. El agua es acoplante.

El modo más práctico y lo reglamentario para usar el acoplador es utilizar una capa delgada de cualquier fluido viscoso que se adiciona en ambas superficies. El sensor debe tener un poco de presión contra la superficie. El secreto es utilizar una capa tan delgada como sea posible. En la figura 27 se muestran unos pocos acopladores de uso general junto con el rango de temperatura donde pueden ser utilizados.

Figura 27. Tipos de acopladores

Some Common Acoustic Emission Couplants and the Approximate Temperature Range Where They Can Be Used	
Dow Corning V-9 resin	-40° to 100° C
High vacuum stop cock grease	-40° to 200° C
Ultrasonic couplants	room temperature
Petroleum grease	room temperature
Water	1° to 99° C
Dow Corning 200 fluid	-273°C to -70°C and -30°C to 200°C
Salol	-40°C to 40°C
Nonaq stop cock grease	-273°C to 100°C
Dental cement	0° to 50°C
50% Indium - 50% Galium mixture	20° to 700°C

Fuente: AE Sensors & Preamplifiers Users Manual

4.3 PREAMPLIFICADOR INTEGRAL DEL SENSOR

El sensor contiene un preamplificador integrado el cual representan un avance significativo para el ámbito de la emisión acústica (EA), conectado una entrada FET de bajo nivel de ruido y un preamplificador de 40 dB.

Este sensor con preamplificador integrando elimina la necesidad de engorrosos pre-amplificadores externos, el cual incorpora dos funciones en una

sola, lo que reduce los costos del equipo y dismininuye el tiempo de instalación para aplicaciones de campo.

Estos sensores con preamplificador integral se desarrollaron con el fin de lograr una alta sensibilidad y la capacidad de conducir la señal por cables largos sin la necesidad de un pre-amplificador por separado.

4.3.1 Características[8]

- Pequeño tamaño, construcción del acero inoxidable.
- Rango de funcionamiento – 45℃ y 80℃ (-25℃-80℃ para las versiones AST).
- Buena inmunidad RFI / EMI.
- Amplio rango dinámico (> 80 dB).
- Bajo nivel de ruido pre-amplificador (~ 2 mV).
- La entrada individual BNC.
- Ideal para el campo / pruebas de laboratorio.
- Auto sensor opción de prueba permite la pulsación del sensor o auto prueba.

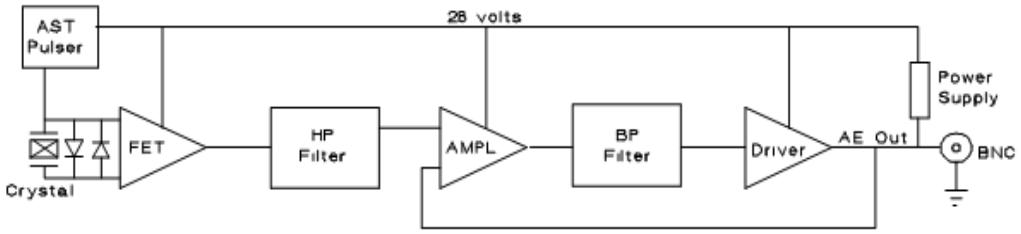
4.3.2 Descripción de funcionamiento.

Los sensores integrales están completamente encerrado en una caja de acero inoxidable y recubierto para reducir las interferencias RFI/EMI al mínimo. Además, se ha aislado térmicamente la etapa de entrada crítica del pre-amplificador, con el fin de proporcionar excelente estabilidad a temperaturas en el rango de -45 ℃ a +80 ℃. Para facilitar el uso, los sensores integra les utilizan un cable coaxial con

[8]AE Sensors & Preamplifiers Users Manual

conector BNC para alimentar el pre-amplificador y llevar a la salida de la señal[9]. El diagrama de bloques del sensor integral se muestra en la Figura28.

Figura 28. Diagrama de bloques del sensor



Fuente: AE Sensors & Preamplifiers Users Manual

4.3.3 Especificaciones eléctricas[10]

- Ganancia: 40 ± 1 dB
- Pico Sensibilidad: 30 dB ref 1 V / mBar
- Ruido (RMS RTI): ~ 2 mV
- Rango dinámico:> 80 dB
- Tensión de salida:> 15 Vpp en 50 ohmios
- Energía requerida: 28 V a 100 mA
- AST pulso: -24 voltios, 0,4 microsegundos en el cristal
- AST Trigger: <2 voltios a la salida del preamplificador (alimentación)
- Cristal completamente encapsulado para Inmunidad de RFI / EMI

4.3.4 Especificaciones físicas[11]

- Temperatura (°C): -45 al 80 (de -25 a 80 AST).
- Limite el choque (g): 500.

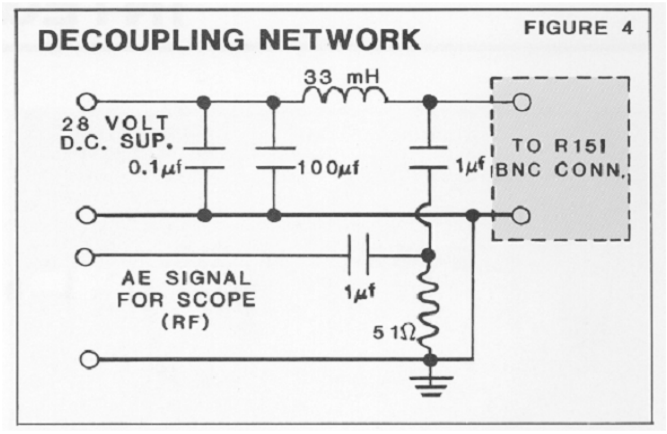
[9]AE Sensors & Preamplifiers Users Manual
[10]AE Sensors & Preamplifiers Users Manual
[11]AE Sensors & Preamplifiers Users Manual

- Material de la caja: acero inoxidable (304).
- Material de la cara: de cerámica.
- Conexión a tierra: cuerpo a tierra y aislada de la superficie de montaje.
- Tipo de conector: BNC.
- Ubicación del conector: lateral.
- Direccionalidad (dB): ± 1,5.
- Sello tipo epoxi.
- Presión: <400 psi de presión hidrostática.

4.4 ALIMENTACIÓN DEL SENSOR Y DESACOPLE DE LA SEÑAL

Como el sensor necesita ser alimentado con + 28 V D.C a través de un cable coaxial, es necesario desacoplar la señal de la emisión acústica de la fuente de alimentación, esto con el fin de poder conectarse a un osciloscopio y analizar la señal. Para esto se realizo una tarjeta alimentadora del sensor y desacopladora de la señal, para las pruebas en el laboratorio, como se muestra en la figura 29.[12]

Figura 29. Circuito alimentador del desacoplador de señal.



Fuente: AE Sensors & Preamplifiers Users Manual.

[12]R15I with Circuit Drawing.pdf

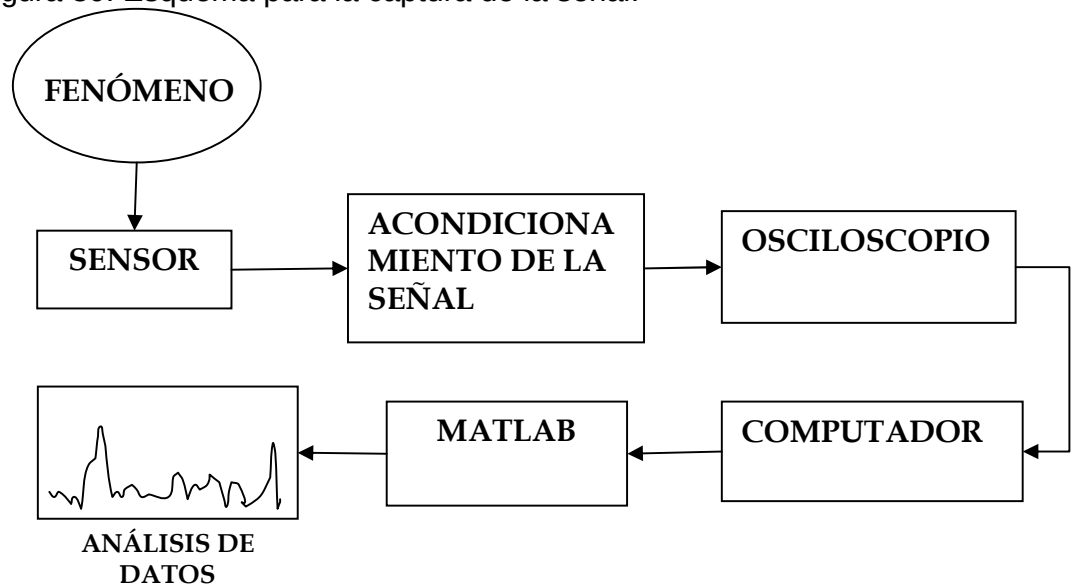
Se realizó un diseño de circuito electrónico en donde se encuentran el circuito alimentador del sensor y el circuito desacoplador de la señal en una tarjeta, ver el anexo D, Desacoplador de señal.

4.5 OSCILOSCOPIO

Para el procesamiento de la señal se utiliza un osciloscopio con puerto SD el cual permite capturar la señal del sensor proveniente del desacoplador y llevarla a un computador para su análisis en Matlab, como se muestra en la figura 30, figura 31,figura 32 y figura 33.

El osciloscopio permite guardar datos de la señal, imágenes de la onda. Para el análisis con Matlab sólo se requerirá de los datos de la señal, los cuales se encuentra en un formato .CSV, estos datos se pueden leer por medio de Excel, el cual permite pasarlos a Matlab de forma sencilla.

Figura 30. Esquema para la captura de la señal.

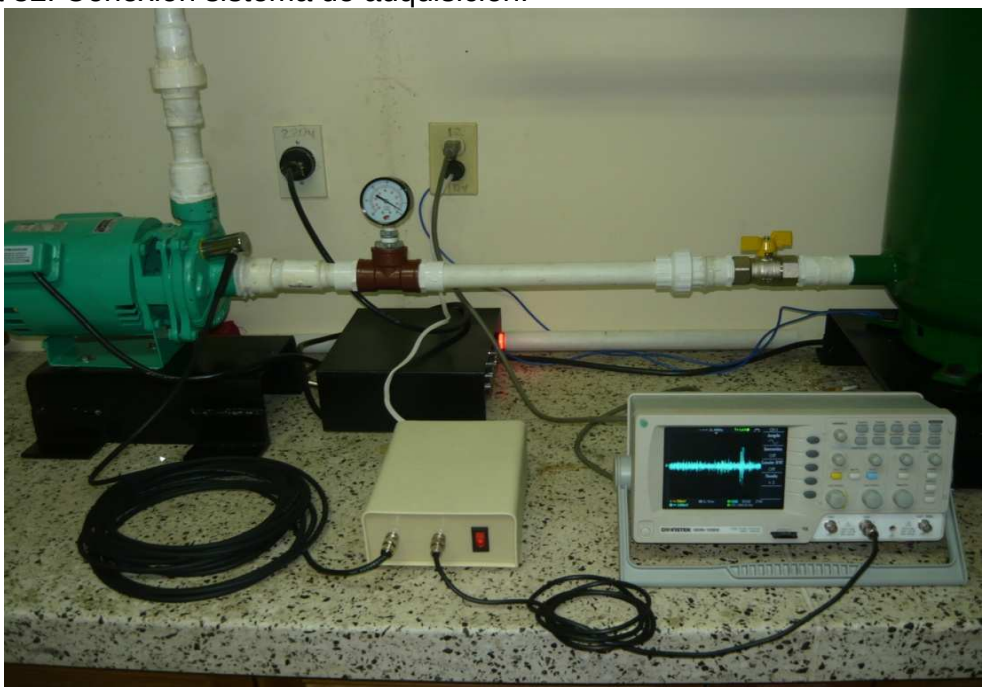


Fuente: Autores

Figura31. Sistema para la captura de la señal.

Fuente: Autores

Figura 32. Conexión sistema de adquisición.



Fuente: Autores

Figura 33. Memoria SD en el osciloscopio.

Fuente: Autores

4.5.1 Formato CSV.

El formato CSV (del inglés *comma-separated values*), es un tipo de documento sencillo para representar datos en forma de tabla, en las que las columnas (campos) se separan por comas (o punto y coma en donde la coma es el separador decimal: España, Francia, Italia...) y las filas por saltos de línea.

Por ejemplo:
aaa,bbb,ccc CRLF
zzz,yyy,xxx CRLF
zzz1,yyy1,xxx1

4.6. ANÁLISIS DE LA SEÑAL CON MATLAB.

4.6.1 MATLAB.

MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices") es un software matemático que ofrece un **entorno de desarrollo integrado** (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas **Unix**, **Windows** y Apple **Mac OS X**.

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets).

Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo. En los últimos años ha aumentado el número de prestaciones, como la de programar directamente procesadores digitales de señal o crear código VHDL.

4.6.2 Manejo de los datos de la señal.

Ya obtenido los datos de la señal en Excel, se procede a crear un vector en el cual estarán estos datos, posteriormente realizar un programa en donde se realiza la FFT a estos vectores y su grafica, el código del programa es el siguiente:

%BANCO DE PRUEBAS PARA EL ANÁLISIS DE CAVITACIÓN EN UNA BOMBA CENTRIFUGA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE EMISIONES ACÚSTICAS
%DIEGO ROBERTO GELVEZ DIAZ

```
%JHONY ALEXANDER MARTELO PARADA

% programa para el análisis de las emisiones acústicas
clearall;
clc;
close;

escala = 5e-2; % escala vertical
periodo = 4e-8;

a=[]; % DATOS DEL OSCILOSCOPIO PARA EL VECTOR a (FUNCIONAMIENTO NORMAL)
A= a*escala; % vector funcionamiento normal. Multiplicado por su escala

b=[];% DATOS DEL OSCILOSCOPIO PARA EL VECTOR b (FUNCIONAMIENTO CAVITACION INCIPIENTE)
B=b*escala; % vector cavitacion. Multiplicado por su escala

c= [];% DATOS DEL OSCILOSCOPIO PARA EL VECTOR c (FUNCIONAMIENTO CAVITACION)
C = c*escala; % vector cavitacion severa. Multiplicado por su escala

d=[];% DATOS DEL OSCILOSCOPIO PARA EL VECTOR c (FUNCIONAMIENTO CAVITACION SEVERA)
D=d*escala; % vector cavitación 3

frecuenciademuestreo = 1/periodo

NA = length(A);% NUMERO DE ELEMENTOS DEL VECTOR A
NB = length(B);% NUMERO DE ELEMENTOS DEL VECTOR B
NC = length(C);% NUMERO DE ELEMENTOS DEL VECTOR C
ND = length(D);% NUMERO DE ELEMENTOS DEL VECTOR D
```

```
nfft = 2^nextpow2(NA) % VALOR DE n DE 2^n

AFFT = fft(A,nfft)/NA;% FFT DEL VECTOR A
BFFT = fft(B,nfft)/NB;% FFT DEL VECTOR B
CFFT = fft(C,nfft)/NC;% FFT DEL VECTOR C
DFFT = fft(D,nfft)/ND;% FFT DEL VECTOR D

f = frecuenciademuestreo/2*linspace(0,1,nfft/2);

NAFFT = length(AFFT);   % NNUEMRO DE ELEMENTOS DEL VECTOR AFFT
NBFFT = length(BFFT);   % NNUEMRO DE ELEMENTOS DEL VECTOR BFFT
NCFFT = length(CFFT);   % NNUEMRO DE ELEMENTOS DEL VECTOR CFFT
NDFFT = length(DFFT);   % NNUEMRO DE ELEMENTOS DEL VECTOR DFFT

% Plot single-sided amplitude spectrum.
plot(f,abs(AFFT(1:nfft/2)),'c',f,abs(BFFT(1:nfft/2)),'b',f,abs(CFFT(1:nfft/2)),'m',f,abs(
DFFT(1:nfft/2)),'r')
title('Espectro de la señal')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('Amplitud |Y(f)|')

ARMS = norm (AFFT)/sqrt(NAFFT)  % VALOR RMS DEL VECTOR AFFT
BRMS = norm (BFFT)/sqrt(NBFFT)  % VALOR RMS DEL VECTOR BFFT
CRMS = norm (CFFT)/sqrt(NCFFT)  % VALOR RMS DEL VECTOR CFFT
DRMS = norm (DFFT)/sqrt(NDFFT)  % VALOR RMS DEL VECTOR DFFT
```

5. ENSAYO DE CAVITACIÓN DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA

Objetivos:

- Obtener el espectro de las emisiones acústicas generado por la cavitación en estado incipiente y cavitación total
- Obtener el valor de ΔP en el cual se presenta la cavitación incipiente.
- Obtener un criterio cuantitativo que permita detectar cuando se está presentando dicho fenómeno como criterio para mantenimiento predictivo en bombas centrífugas.

Realización de la práctica:
Para realizar un ensayo de Cavitación de una bomba se necesita medir:

- Presión manométrica salida de la bomba centrífuga, pd.
- Presión de succión a la entrada de la bomba centrífuga, ps.
- Presión de vacío en el depósito, pv.
- Curva de la bomba.

El banco se encuentra diseñado de tal forma en el cual se puedan realizar infinidad de escenarios, pero para este caso sólo se tomaran los descritos a continuación.

Se mide la presión de entrada y salida de la bomba en el manómetro y el vacuómetro dispuesto para ello. El caudal lo tomamos de la curva de la bomba entrando con el ΔP y la presión de vacío con un vacuómetro dispuesto en el depósito del sistema.

El caudal se regula con la válvula de globo y la presión de vaciópv sevaríacon la válvula de admisión de aire (ver figura 2 del anexo D). Los diámetro de las tuberías son D=1in. La entrada de agua al depósito está situada por debajo del nivel de agua de forma que se evite la formación adicional de burbujas que puedan falsear la medida.

Figura 34. Banco de cavitación por vació

Fuente: Autores

1, 4 Vacuómetro, 2 Manómetro, 3 Válvula de globo, 5 válvula de admisión de aire

Con las medidas tomadas, el cálculo de las magnitudes necesarias es el siguiente:

Se toma una serie de medidas con el caudal nominal a 100% equivalente a 42 gpm, luego al 95% equivalente a 40 gpm, luego al 83% equivalente a 35 gpm, y

por último al 60% equivalente al 25 gpm, para un total de cuatro casos en donde se medirán las variables necesarias (pv, pd, y ps).Para ello se anexa una tabla diseñada de manera secuencial para facilitar el cálculo, donde el color verde indica los valores tomados del los dispositivos de medición, lo demás son los calculados por el estudiante.

Cuando la bomba empiece a cavitar la altura (ΔP) desciende bruscamente. El criterio que elegimos para encontrar la cavitación incipiente, consiste en tomar el espectro cuando la altura (ΔP) ha disminuido un 3%,además se tomaran cuatro (4) espectros para cada posición de la válvula reguladora de caudal y realizara un margen porcentual que indica cuanto varía el $H_{inicial}$del H(3%), estos son:

$$\% = H_{inicial} / H\ (3\%)$$

1. Bomba trabajando en condiciones normales, es decir a presión atmosférica.
2. Bomba con cavitación incipiente.
3. Bomba cavilando.
4. Bomba con cavitación severa.

Para realizar el cálculo del H (ft) se aplica la siguiente conversión:

$$H(ft) = 2.306659 * (Pd + Ps)$$

Para todos los casos se tienen los siguientes datos iníciales:

Tabla 5. Datos iníciales para el desarrollo del laboratorio

ρ	**1000**	**Kg/m³**
G	**9.81**	**ft/s²**
PV	**3.67**	**Kpa**
A	**0.00050671**	**m²**
f	**0.0109**	
D	**0.0254**	**m**
Lequ	**14.633**	**m**

Fuente: Autores

Los datos obtenidos se registraran en las siguientes tablas:

Normal.

Cavitación Incipiente.

Cavitación.

Cavitación severa.

Caso 1. Caudal nominal al 100%.

Tabla 6. Datos de la práctica caso 1

Pd (Pa)	Ps(Pa)	H (m)	Po(Pa)	%
110316	29997.5	14.3031	0	0.97
96526.6	43329.8	14.2565	13332.2	0.97317
82737.1	56662	14.2099	26664.5	0.97636
68947.6	63328.1	13.4838	33330.6	1.02894
55158.1	69994.3	12.7576	39996.7	1.08751
	H(3%)=	**13.874**	**m**	

Fuente: Autores

Caso 2. Caudal nominal al 95 % (40 gpm).

Tabla 7. Datos de la práctica caso 2

Pd (Pa)	Ps(Pa)	H (m)	Po(Pa)	%
110316	24664.6	13.7595	0	0.97
99974	38663.5	14.1323	13332.2	0.94442
75842.3	58661.9	13.7109	33330.6	0.97344
62052.8	71994.1	13.6643	46662.8	0.97676
48263.3	76660.4	12.7343	50662.5	1.04809
27579	77327	10.6938	53329	1.24808
	H(3%)	**13.3467**	**m**	

Fuente: Autores

Caso 3. Caudal nominal al 83% (35 gpm).

Tabla 8. Datos de la práctica caso 3

Pd (Pa)	Ps(Pa)	H (m)	Po(Pa)	%
131000	19998.4	15.3923	0	0.97
117211	34663.8	15.4816	13332.2	0.96441
110316	41329.9	15.4583	19998.4	0.96586
99974	47996.1	15.0836	26664.5	0.98985
89631.8	54662.2	14.7089	33330.6	1.01507
82737.1	61328.3	14.6856	39996.7	1.01668
75842.3	67994.4	14.6623	46662.8	1.0183
68947.6	74660.5	14.639	53329	1.01992
	H(3%)=	**14.9306**	**m**	

Fuente: Autores

Caso 4. Caudal nominal al 60% (25 gpm).

Tabla 9. Datos de la práctica caso 4

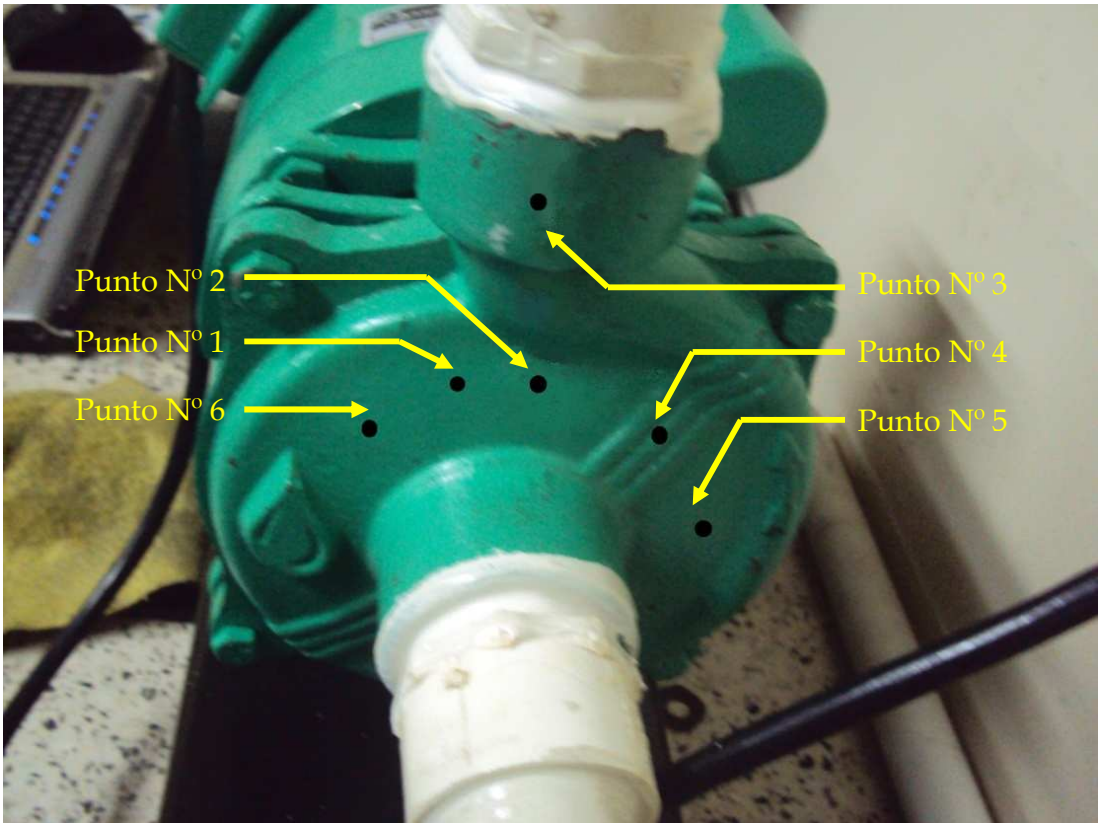
Pd (Pa)	Ps(Pa)	H (m)	Po(Pa)	%
165474	5546.21	17.4333	0	0.97
151685	19998.4	17.5008	13332.2	0.96626
141343	26664.5	17.1261	19998.4	0.9874
134448	33997.2	17.1707	26664.5	0.98483
124106	41329.9	16.864	33330.6	1.00275
117211	47996.1	16.8407	39996.7	1.00413
110316	53995.6	16.7494	46662.8	1.0096
103421	61328.3	16.7941	53329	1.00692
		H(3%)= 16.9103 m		

Fuente: Autores

5.1 PUNTO DE INSPECCIÓN EN LA BOMBA

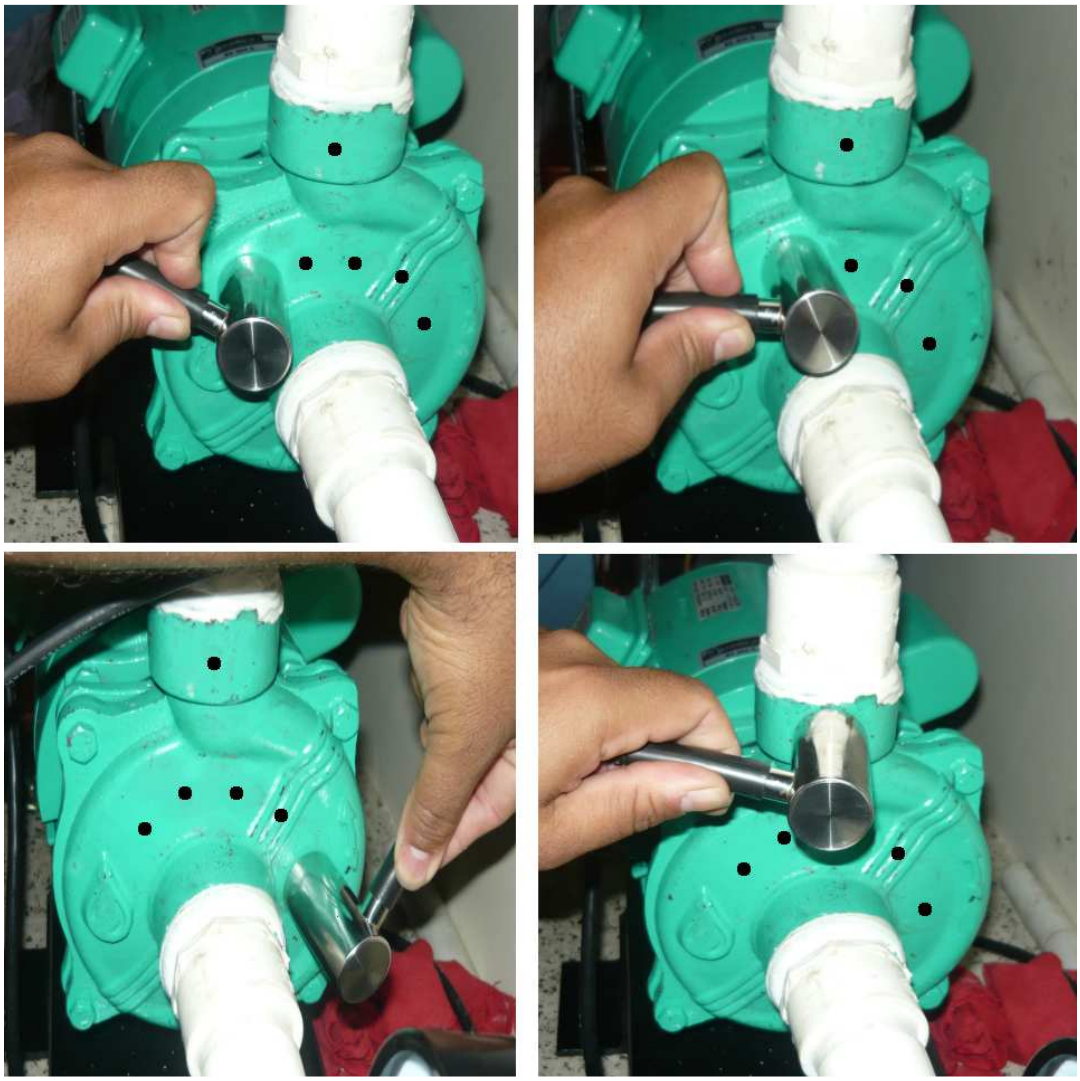
Con el fin de garantizar una buena toma de datos de las emisiones acústicas se hizo la búsqueda del mejor punto de inspección en la bomba, en donde el sensor realizara la captura de las emisiones acústicas, para ello se realizaron varias tomas de datos en diferentes puntos en la bomba centrífuga como se muestra en la figura 35 y figura 36.

Figura 35. Puntos de inspección



Fuente: Autores

Figura 36. Análisis de los puntos de inspección.



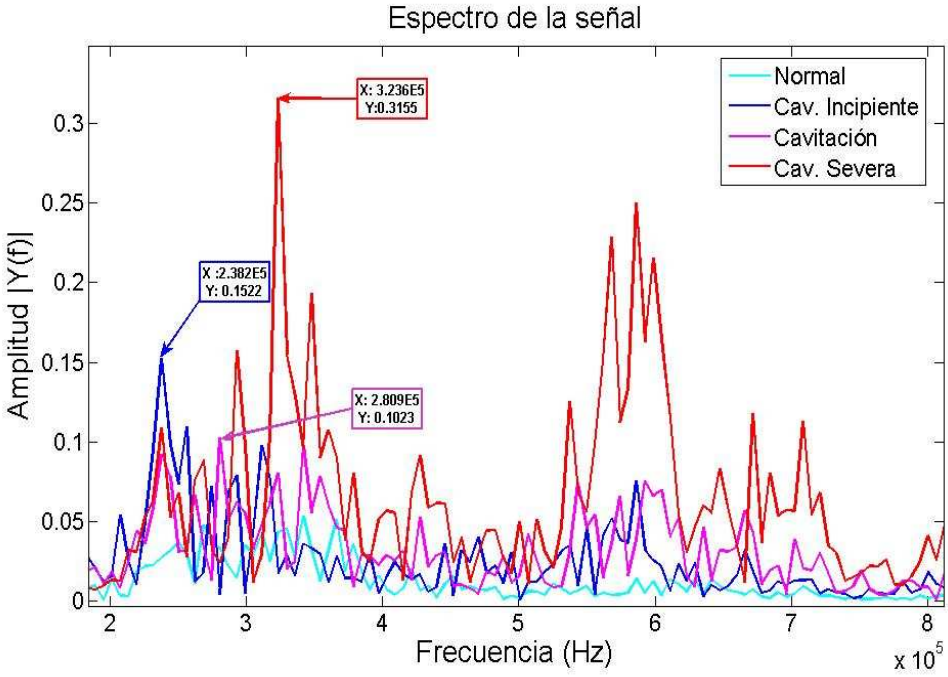
Fuente: Autores

De esta forma se pudo concluir que el punto Nº 1 es el mejor para realizar la inspección en la bomba centrífuga, ya que permite al sensor realizar una buena captura de las emisiones acústicas generadas por la cavitación siendo este el fenómeno de análisis.

5.2 ANÁLISIS DE LOS DATOS

5.2.1 Análisis de los datos caso 1.

Figura 37. Esquema acústico caso 1.



Fuente: Autores

Tabla 10. Valores RMS caso 1.

ESTADO	RMS
Normal	0.0075
Cavitación incipiente	0.0090
Cavitación	0.0078
Cavitación severa	0.0133

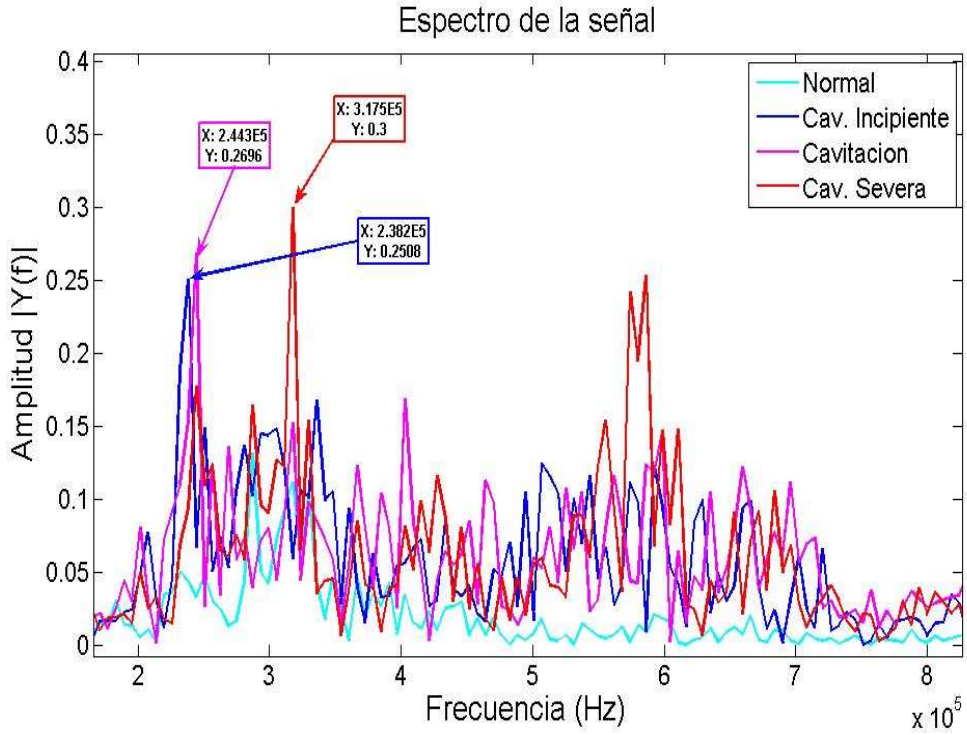
Fuente: Autores

Analizando los resultados del caso 1, se encontró un rango de frecuencia de cavitación entre 200 KHz a 700 KHz con picos muy marcados entre 200 KHz y 400

KHz, se muestra un comportamiento muy aleatorio[13] y se observa un crecimiento proporcional del RMS excepto en el caso de cavitación por encima de la incipiente.

5.2.2 Análisis de los datos caso 2.

Figura 38. Esquema acústico caso 2.



Fuente: Autores

Tabla 11. Valores RMS caso 2.

ESTADO	RMS
Normal	0.0059
Cavitación incipiente	0.0091
Cavitación	0.0131
Cavitación severa	0.0109

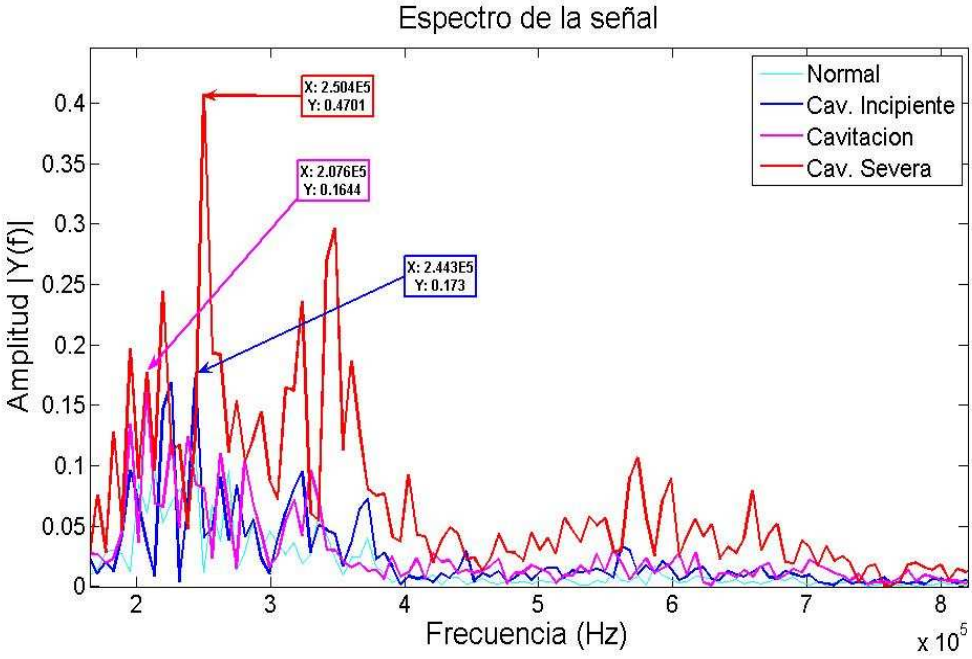
Fuente: Autores

[13] **L. Alfayez; D. Mba; G. Dyson,** The application of acoustic emission for detecting incipient cavitations and the best efficiency point of a 60 kW centrifugal pump

En este caso se encontró nuevamente frecuencias entre los 200 KHz y 700 KHz con picos de mayor amplitud que el caso 1 entre 200 KHz y 400 KHZ, se mantiene el comportamiento aleatorio[14] y el crecimiento proporcional del RMS.

5.2.3 Análisis de los datos caso 3.

Figura 39. Esquema acústico caso 3.



Fuente: Autores

Tabla 12. Valores RMS caso 3.

ESTADO	RMS
Normal	0.0049
Cavitación incipiente	0.0062
Cavitación	0.0061
Cavitación severa	0.0124

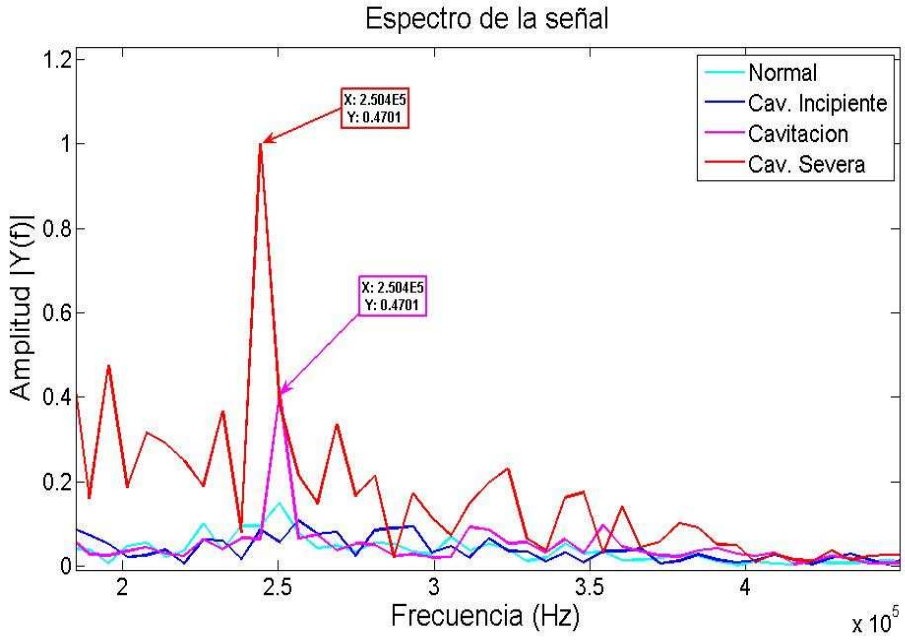
Fuente: Autores

[14] **L. Alfayez; D. Mba; G. Dyson,** The application of acoustic emission for detecting incipient cavitations and the best efficiency point of a 60 kW centrifugal pump

Se encontró frecuencias entre 200 KHz y 400 KHz, se muestra un comportamiento aleatorio[15], se observa un crecimiento proporcional del RMS excepto en el caso de cavitación por encima de la incipiente igual que el primer caso.

5.2.4 Análisis de los datos caso 4.

Figura 40. Esquema acústico caso 4.



Fuente: Autores

Tabla 13. Valores RMS caso 4.

ESTADO	RMS
Normal	0.0096
Cavitación incipiente	0.0097
Cavitación	0.00151
Cavitación severa	0.0391

Fuente: Autores

[15]**L. Alfayez; D. Mba; G. Dyson,** The application of acoustic emission for detecting incipient cavitations and the best efficiency point of a 60 kW centrifugal pump

En el último caso se tiene un intervalo de frecuencias entre 150 KHz y 400 KHz con picos de amplitudes considerables comparadas con los casos anteriores, es bueno resaltar que el sensor utilizado presenta mayor estabilidad con frecuencias por encima de 200 KHz; se puede concluir que la energía espectral en el rango establecido para la detección aumenta en la medida que el caudal de la bomba se reduce.

.

CONCLUSIONES

Los resultados del análisis de las emisiones acústicas (EA) han mostrado una clara relación proporcional entre las EA y cavitación, se observó aumento en RMS a diferentes niveles de las EA. Sin embargo, se observó una reducción del RMS en nivel de cavitación por encima de la incipiente en todos los escenarios y en diferentes pruebas. Esto sugiere que la técnica de las EA es más eficaz en la detección de la cavitación incipiente, y en comparación con estados de cavitación más elevados.

Se observa que las frecuencias están dentro del rango esperado, siendo este intervalo de análisis entre 200 KHz y 600 KHz y también se puede apreciar en las graficas que tiene un claro comportamiento aleatorio.

Se comprobaron las ventajas de la utilización de las EA para el mantenimiento predictivo, comparado con otras técnicas, se pueden resumir en:

- Es un método no intrusivo en su totalidad.
- Toda la información se consigue con un sólo sensor, lo que se compara favorablemente con sistemas basados en vibración que frecuentemente necesita de varios acelerómetros.
- Se puede detectar la falla antes de que ocurra, es decir en un estado incipiente.
- No necesita de aislamiento acústico con el entorno.

Se construyó un Banco para pruebas de cavitación por medio de vacío en el depósito ubicado en el laboratorio de vibraciones mecánicas el cual permitirá a los alumnos del área de turbomáquinas hidráulicas y vibraciones mecánicas, determinar el comportamiento de la cavitación; entregando a la Escuela de

Ingeniería Mecánica un equipo funcional de fabricación local; además de lograr una banco de fácil manejo y mantenimiento, con partes, elementos y repuestos provenientes del comercio de la ciudad de Bucaramanga.

Se adquirió un sensor acústico WDIU-AST banda ancha Importado de Estados Unidos, adecuado para la captura de las EA de la bomba centrífuga, el cual es entregado a la Escuela de Ingeniería Mecánica para futuras investigaciones.

Se realizo una tarjeta alimentadora y desacopladora de la señal para el sensor WDIU-AST, la cual permite la alimentación del sensor y la extracción de la señal, de fácil manejo, entregada a la Escuela de Ingeniería Mecánica para el buen funcionamiento del sensor nombrado.

Se realizo el análisis de las emisiones acústicas (EA) en la bomba centrífuga del banco por medio de MATLAB, realizando la inspección en condición de normal y bajo distintos grados de cavitación.

Se elaboro un manual de operación y procedimiento para el manejo del banco el cual se encuentra en el anexo D.

Se diseñó una experiencia académica (práctica) y se elaboro una documentación detallada de misma, con el respectivo análisis de las emisiones acústicas.

Se sintetizo los resultados de la experimentación en un artículo tipo científico que contiene introducción, marco teórico, experimentación, conclusiones y referencias, el cual se encuentra en el anexo F.

Se impulsa la línea de investigación en el área de inspección y mantenimiento predictivo, dejando abierta la posibilidad de futuras investigaciones.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar grasa, pasta dental o gel entre el sensor y la superficie de contacto (bomba) para homogenizar el contacto y mejorar la captación de la emisión acústica.

- Se recomienda no utilizar simultáneamente de otro equipo o accesorio que se encuentre conectado en la misma fase de los equipos utilizados para la realización de la práctica ya que hace variar el espectro significativamente.

- Se recomienda tomar el espectro después de que el sistema se estabilice, es decir, después de variar la presión del depósito esperar que el flujo se normalice.

- Se recomienda tener mucho cuidado con el manejo del sensor, evitarse los golpes, caídas, choques, mantener el sensor limpio y resguardado en su respectiva caja plástica, también hay que tener mucho cuidado con el cable coaxial del sensor, tener siempre presente de no pisarlo, quebrarlo, o romperlo, ya que un buen funcionamiento del sensor depende del estado optimo del cable coaxial.

BIBLIOGRAFÍA

CRANE, División de Ingeniería. Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías. Mc. Graw Hill. 1992.

DÍAZ F., Luis Eduardo; MUSTAFÁ I., Yamal, RIOS A., Luis Guillermo, Construcción y puesta en marcha de un banco de cavitación para bombas centrífugas pequeñas, Scientia et Technica, Mayo de 2006

HARRIS, Cyril M., Manual de Medición Acústica y control de Ruido, edit., Mc. Graw Hill, 1995.

L. ALFAYEZ; D. MBA; G. DYSON, The application of acoustic emission for detecting incipient cavitations and the best efficiency point of a 60 kW centrifugal pump: case study, NDT&E international, 10 Dic. 2004

L. ALFAYEZ, D. MBA, G. DYSON., Detection of incipient cavitations and the best efficiency point of a 2.2MW centrifugal pump using Acoustic Emission, EWGAE, 2004

MATAIX; Claudio., Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas, segunda edición, Mc. Graw Hill. 1992.

MBA, D. AND BANNISTER, R.H. (1999)**,** Condition monitoring of low-speed rotating machinery using stress waves: Part1 and Part 2. *ProcInstMechEngrs.***213**(3), Part E, 153-185.

MORHAIN, A, Mba, D, Bearing defect diagnosis and acoustic emission Journal of Engineering Tribology, I Mech E, Vol 217, No. 4, Part J, p 257-272, 2003. ISSN 1350-6501Mba, D. (2002).

POLO ENCINAS, Manuel, Turbo-máquinas hidráulica principios fundamentales**.**

T. BOCZAR, M. SZMECHTA, D. ZMARZLY., Acoustic Emission Measurements of Acoustically Induced Cavitation Bubbles in Insulating Oils, Opole University of Technology, 30 Jun. 2008

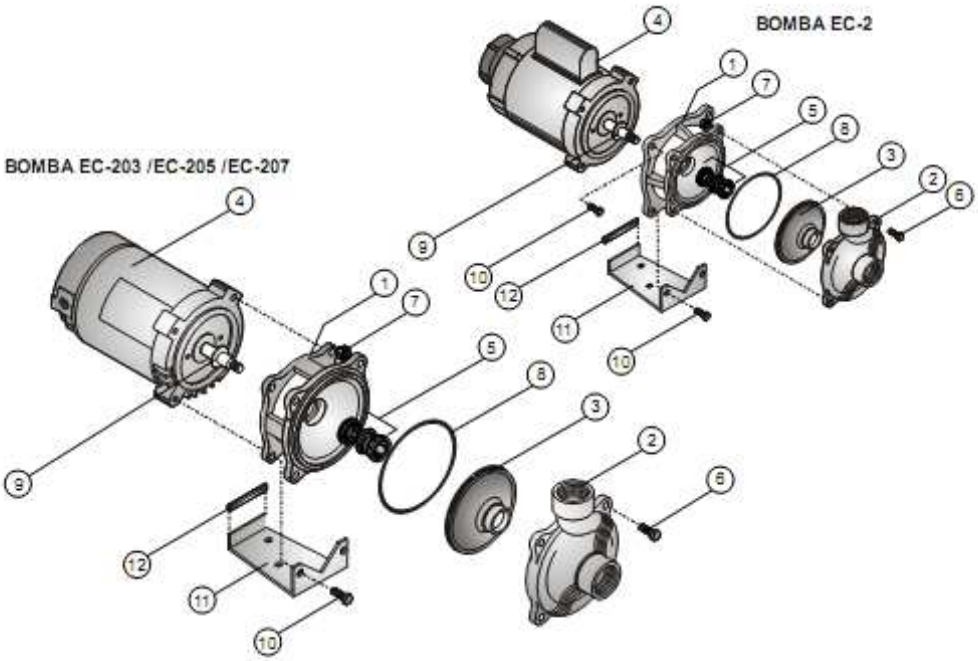
TOUTOUNTZAKIS, T. and Mba, D. (2003).Observation of Acoustic Emission Activity during Gear Defect Diagnosis.NDT and E International. 36(7), 471-477.

ANEXOS

ANEXO A. CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA CENTRÍFUGA.

LINEA CARACOL
EC-2 /EC-203 /EC-205 /EC-207

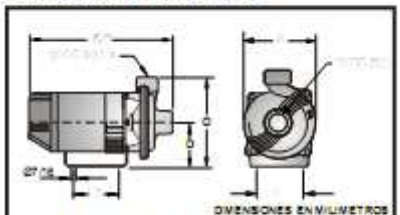
BARNES DE COLOMBIA S.A.



LISTA DE PARTES

No	DESCRIPCIÓN	REF.	CANTIDAD			
			EC-2	EC203	EC205	EC207
1	ACOPLE EN HIERRO	19584	1			
1	ACOPLE EN HIERRO	19589		1	1	1
2	CUERPO EN HIERRO	31436	1			
2	CUERPO EN HIERRO	31437		1	1	1
3	IMPULSOR ø3.700"	23022	1			
3	IMPULSOR ø3.890"	22389		1		
3	IMPULSOR ø4.000"	22400			1	
3	IMPULSOR ø4.560"	22456				1
4	MOTOR 1/4 MONOF.	-	1			
4	MOTOR 1/2 MONOF.	-		1	1	
4	MOTOR 3/4 MONOF.	-				1
5	SELLO MECANICO 5/8"	12703	1	1	1	1
6	TORNILLO 1/4" x 1-1/4" NC	22573	4			
6	TORNILLO 5/16"x1-1/4" NC	02220		4	4	4
7	TUERCA 1/4" NC	02508	4			
7	TUERCA 5/16" NC	02501		4	4	4
8	ANILLO "O"	17731	1			
8	ANILLO "O"	17732		1	1	1
9	ARANDELA DE CAUCHO	12752	1	1	1	1
10	TORNILLO 3/8"x3/4" NC	02195	4	4	4	4
11	BASE EN LAMINA	14427	1	1	1	1
11	BASE EN LAMINA	14428	1	1	1	1
12	EMPAQUE DE CAUCHO	30439	1	1	1	1

DIMENSIONES GENERALES



DIMENSIONES EN MILIMETROS

MODELO	SUCC x DESC.	CP	C	D	F	A	E	PESO
EC-2	1" x 1"	325	180	90	78	160	80	8.4 Kg
EC-203	1-1/4"x1-1/4"	384	225	112	78	160	80	12.0 Kg
EC-205	1-1/4"x1-1/4"	384	225	112	78	160	80	13.1 Kg
EC-207	1-1/4"x1-1/4"	384	225	112	78	160	80	14.4 Kg

LINEA CARACOL

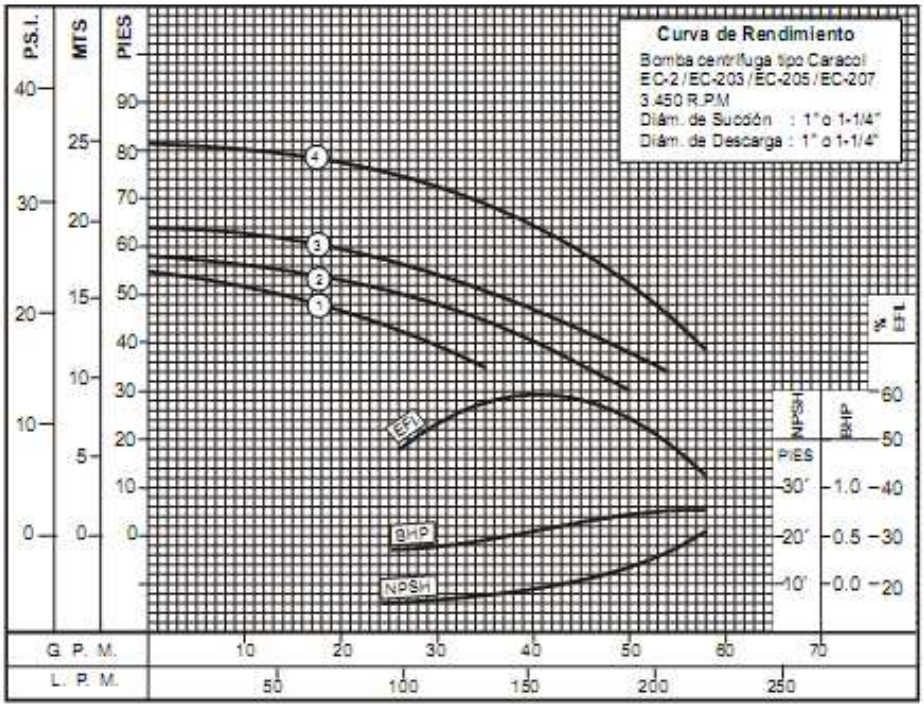
EC-2 /EC-203 /EC-205 /EC-207

CARACTERISTICAS

- Bomba centrífuga de construcción monobloque fabricada en hierro fundido.
- Diámetro de succión de 1" o 1-1/4" y descarga de 1" o 1-1/4" (según modelo)
- Impulsor cerrado fabricado en plástico de alta resistencia
- Temperatura máxima de operación 70°C
- Motores a prueba de goteo,3.450 RPM 60Hz, NEMAC 56J

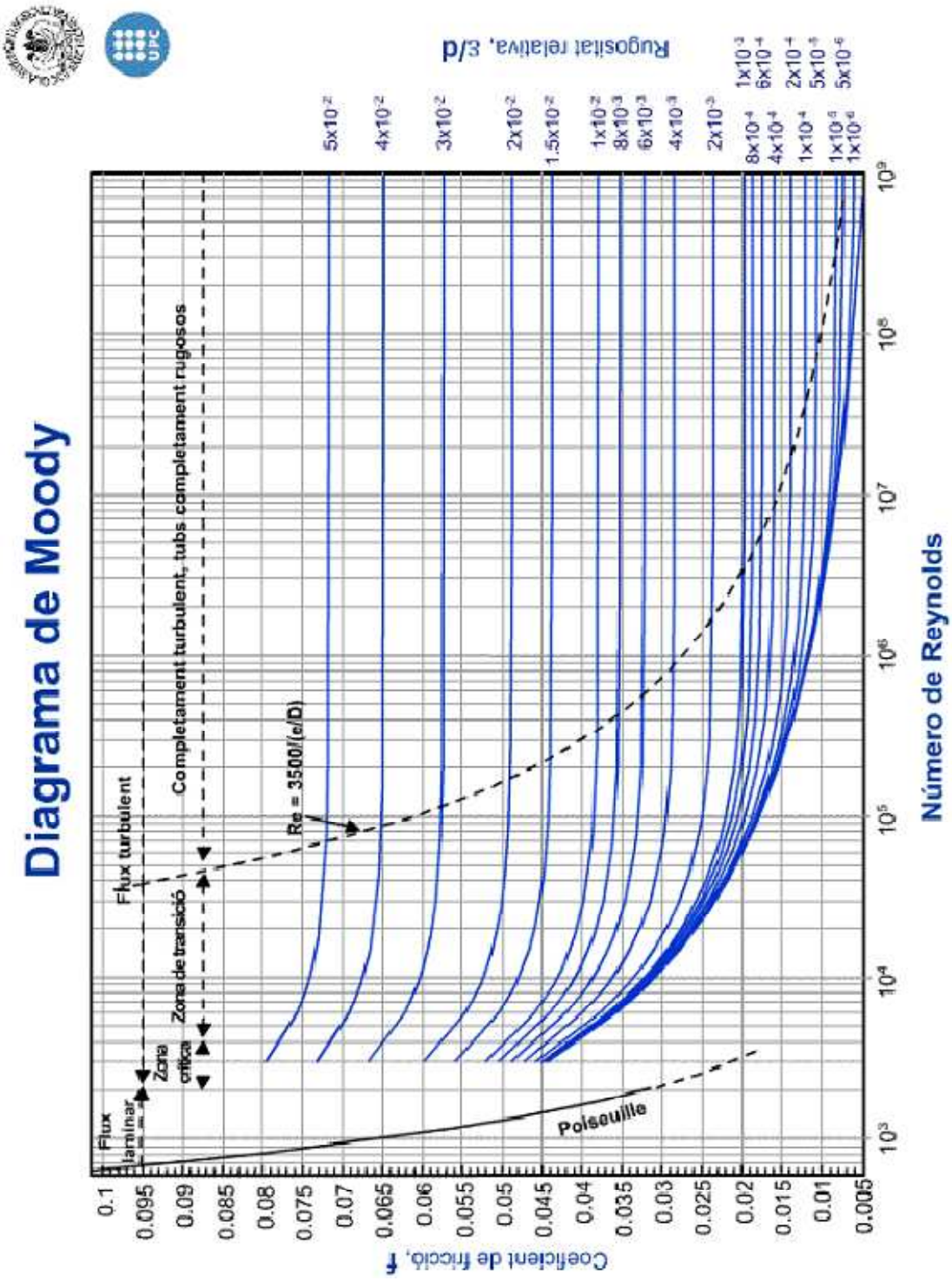
APLICACIONES

- Uso doméstico
- Aprovisionamiento de aguas limpias
- Refrigeración de maquinaria
- Llenado de tanques y bebederos
- Recirculación de agua en piscinas
- Pequeños equipos de presión



No	MODELO	HP	VOLTAJE	AMP.	FASES	DIA. IMP.	øSUCC.	øDESC.
1	EC-2	1/4	115	7.8	1	3.700"	1"	1"
2	EC-203	1/2	115/230	10.4/5.2	1	3.690"	1-1/4"	1-1/4"
3	EC-205	1/2	115/230	10.4/5.2	1	4.000"	1-1/4"	1-1/4"
4	EC-207	3/4	115/230	13.6/6.8	1	4.560"	1-1/4"	1-1/4"

ANEXO B. DIAGRAMA DE MOODY



ANEXO C. SENSOR

AE Sensors and PreamplifiersUsers Manual

Table of Contents

1. INTRODUCTION: AE SENSORS 1

2. DETECTION OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS 1

3. AE TRANSFER COUPLING 2

4. INTEGRAL PREAMPLIFIER SENSORS 3

4.1 Features 3
4.2 FunctionalDescription 3
4.3 Specifications 4

5. PREAMPLIFIER INTRODUCTION 5

5.1 0/2/4 and 2/4/6 Preamplifiers 6
5.1.1 Description 6
5.1.2 0/2/4 and 2/4/6 Specifications 6
5.1.3 Installation and Operation 7
5.2 In Line Differential Preamplifiers (IL-XX-D) 8
5.2.1 Description 8
5.2.2 Specifications 8
5.2.3 Standard Filters 8
5.2.4 Installation and Operation 9
5.3 In-Line Single Ended Preamplifiers (IL-40S) 9
5.3.1 Description 9
5.3.2 Specifications 9
5.3.3 Features 9
5.3.4 Installation and Operation 10
5.4 1222 ChargePreamplifiers 10
5.4.1 IntroductiontoChargePreamplifiers.. 10
5.4.2 1222 PreampDescription 10
5.4.3 Specifications 11
5.4.4 Installation and Operation 11
5.5 1227A and 1227B Preamplifiers 11
5.5.1 Description 11
5.5.2 Specifications 12
5.5.3 Standard Filters 12
5.5.4 Installation and Operation 12
5.6 1227 WT High TemperaturePreamplifier 12
5.6.1 Description 12
5.6.2 Specifications 12
5.7 1220A, 1220B, 1220C Preamplifiers 13
5.7.1 Specifications of the 1220 Series Preamplifiers 14
5.7.2 1220 PreamplifierDescription 14
5.7.3 PreamplifierInstallation and Operation 17

5.7.4 1220 Series FilterReplacement..... 18
5.7.5 CircuitDescription. 19

6. AUTO SENSOR TESTING.....20
6.1 Other Automatic Sensor Pulsing Techniques..... 20
6.2 AST Application and Advantages..... 20
6.3 AST Requirements..... 21

7. 1224 SERIES REPEATER AMPLIFIER.....22
7.1 Introduction 22
7.2 Specifications 22
7.3 1224 Configurations/Designations..... 22
7.4 Operational Description of the 1224 Repeater Amplifier..... 23

7.5 1. INTRODUCTION: AE SENSORS

THE MOST IMPORTANT SINGLE FACTOR IN SUCCESSFULLY PERFORMING AN 7.6 AE APPLICATION IS THE RELIABILITY OF AN AE SENSOR

High reliability is achieved by PAC's long experience in the successful design and production of numerous types of electro acoustic sensors for AE research, field and production applications. After years of continuous research and development by several members of our engineering staff, PAC is now becoming the recognized leader in the manufacturing of AE sensors. PAC's production flexibility provides the user with a large selection of transducers to fit many individual applications. The selection of the proper AE sensor depends on the specific application. Individual specification sheets have been prepared with specific recommended applications and features. Our engineers are also available to discuss your requirements, and, if necessary, to custom design sensors for your unique applications at moderate costs.

7.7 2. DETECTION OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS

Because an acoustic emission sensor converts the mechanical energy carried by the elastic wave into an electrical signal, the sensor is more properly termed a transducer. The transducer most often used in AE applications is the piezoelectric transducer. This choice has been dictated by the ease with which it may be built, its inherently high sensitivity, and a ruggedness which allows its use in industrial applications.

The active element of a piezoelectric transducer is a thin disk of piezoelectric material (a material which can convert mechanical deformation into electrical voltage). This disk is metalized on both faces for electrical contact, and mounted in a metal cylinder to provide electromagnetic interference shielding. The piezoelectric ceramics commonly used in AE transducers are made of small crystals of titanates and zirconates which are mixed with other materials, molded to the desired shape, and fired in a kiln. The ceramic material is then made piezoelectric by poling, which is the process of heating the material above its Curie temperature while the material is in a strong electric field.

To take advantage of the extreme sensitivity of the piezoelectric transducer, it must be attached to the material under observation in such a manner that the acoustic energy passes into the transducer with minimum loss at the transducer-material interface. The required intimate mechanical contact is achieved on flat surfaces by mechanical clamping using thin films of grease, oil or epoxy adhesive between the transducer and the material. In general, the problem of coupling is much more severe for shear wave observation because the coupling medium must be sufficiently viscous to support the shear motion.

Though it appears that a piezoelectric transducer properly coupled to a specimen should be an ideal sensor for acoustic emission work, there are some important limitations. Though the theory of piezoelectricity accurately relates the output voltage of a piezoelectric material to the stress on its free surface, complications arise when the transducer is coupled to a real material. The tightly coupled material changes the mechanical boundary conditions that existed at the previously free surface of the transducer. Hence the displacement and stress at the transducer are quite dfferent from their values in the absence of the material.

The very complicated interaction between the transducer and what it is trying to measure has made it difficult to relate the transducer output voltage exactly to what is happening within the sample. If the acoustic wave is not a plane wave, further complications arise because of the variation in phase over the transducer surface. While these problems of the piezoelectric transducer have been troublesome in basic research aimed at trying to uncover the nature of the AE source event, the piezoelectric transducer has proven time and again to be more than adequate for most general nondestructive testing applications.

7.8 3. AE TRANSFER COUPLING

When a sensor has simply been placed on the surface of the material containing the acoustic wave it is found that the sensor produces a very weak signal. If a thin layer of a fluid is placed between the sensor and the surface, a much larger signal is obtained. The use of some type of couplant is almost essential for the detection of low level acoustic signals. Physically, this can be explained by looking at the acoustic wave as a pressure wave transmitted across two surfaces in contact. On a microscopic scale the surfaces of the sensor and the material are quite rough, only a few spots actually touch when they are in contact. Stress is force per unit area and the actual area transmitting a force is very small. If the microscopic gaps are filled with a fluid, the pressure will be uniformly transferred between the surfaces. For a shear wave with a variable strain component parallel to the surfaces, again very little strain will be transferred between the surfaces because of the few points in actual contact. In this case filling the gaps with a low viscosity liquid will not help much since such a liquid will not support a shear stress. However, a high viscosity liquid or a solid will help transmit the parallel strain between surfaces. The purpose of a couplant, then, is to insure good contact between two surfaces on a microscopic level.

A couplant is any material which aids the transmittal of acoustic waves between two surfaces, while a bond is a couplant which physically holds the sensor to the surface. Water is couplant and cured epoxy resin is a bond. Many problems have come about from using a bond in an inapplicable way. If a rigid bond is used to attach a sensor to a sample which elastically deforms during the test, the normal result is a broken bond and poor or no sensitivity to the acoustic wave. Similarly, in an experiment where the temperature is changed appreciably, the use of a rigid bonding material can lead to broken bonds due to differential thermal expansion between the sensor and the sample.

Bonding agents, then, must be chosen with great care and the primary emphasis must be put upon the compatibility of the materials under the test conditions. Usually if the bond will hold the sensor on, it will be an adequate couplant. For a compressional wave any fluid will act as a couplant. A highly viscous fluid will transfer some shear stress across the boundary which may or may not be an advantage. The most practical rule is to use as a couplant a thin layer of any viscous fluid which wets both surfaces. The sensor should be held against the surface with some pressure furnished by magnets, springs, tape, rubber bands, etc. The secret is to use as thin a layer as possible. If a rigid bond is used there must be no differential expansion between the two surfaces. In Table 3.1 a few commonly used couplants are listed along with the temperature range where they can be used.

Table 3.1

Some Common Acoustic Emission Couplants and the Approximate Temperature Range Where They Can Be Used

Dow Corning V-9 resin	-40° to 100° C
High vacuum stop cock grease	-40° to 200° C
Ultrasonic couplants	room temperature
Petroleum grease	room temperature
Water	1° to 99° C
Dow Corning 200 fluid	-273 °C to +70° C and +30°C to 200°C
Salol	-40°C to 40°C
Nonaq stop cock grease	-273° C to 100°C
Dental cement	0° to 50°C
50% Indium - 50% Gallium mixture	20° to 700°C

4. INTEGRAL PREAMPLIFIER SENSORS

The R3I, R6I, R151, R30I, R50I and WDI integral preamplifier sensors represent a significant advancement for the field of acoustic emission by enclosing a low-noise FET input 40 dB pre-amplifier inside a standard high sensitivity sensor. These rugged, small size AE integral pre-amplifier/sensors eliminate the need for cumbersome pre-amplifiers by incorporating two functions into one, thereby reducing equipment costs and decreasing set-up time for field applications. These sensors also come with optional "Auto Sensor Test" capability designated with an "AST" suffix after the sensor model type (e.g. R15I-AST). AST models offer an internal sensor pulsing capability when used with A or AST-capable AE systems with the AST capability such as DiSP, MISTRAS, LAM or SPARTAN 2000. AST provides an automated means of pulsing and receiving a simulated AE burst that is coupled to the structure. AST tests the entire AE signal processing chain starting with the sensor coupling, through the sensor and preamplifier, cabling and AE system electronics. This is useful for testing individual sensor coupling, verifying the response of other sensors attached nearby to the same structure, establishing inter-

sensor timing parameters that can be used to determine sensor spacing and providing verification of the repeatability of the AE sensors throughout the AE
test.

These integral preamplifier sensors were developed with the purpose of attaining high sensitivity and the capability of driving long cables without the need of a separate pre-amplifier. In addition, they connect directly to all existing PAC AE instruments and systems and are also compatible with other manufacturers' systems.

4.1 Features

- Small size, stainlesssteelconstruction
- Operation range — 45°C-80°C (-25°C-80°C for AST versions)
- Good RFI/EMI immunity
- Wide dynamicrange (>80 dB)
- Low noise pre-amp (~2 (iV)
- Single BNC input/output (power signal)
- Interchangeable with existing pre-amp/sensors
- Ideal forfield/labtesting

- Auto Sensor Test option allows for sensor pulsing or self-test **4.2**

Functional Description

The integral sensors are completely enclosed in a stainless steel case and coated to minimize RFI/EMI interference. In addition, care has been taken to thermally isolate the critical input stage of the pre-amplifier, in order to provide excellent temperature stability over the range of -45°C to +80°C. For ease of use, the integral sensors utilize a standard coaxial cable with BNC connector to power the pre-amp and carry the output signal. The complete block diagram of the integral sensor is shown below in Figure 1.

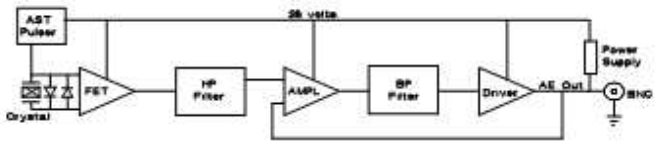


Figure 1. Integral Sensor Block Diagram

4.3 Specifications <u>Electrical</u>

<u>Specifications:</u>

Gain:	
Peak Sensitivity:	40 ± 1 dB
Noise (RMS rti):	30 dB ref 1 V/mBar
Dynamic Range:	~2 µV
Output Voltage:	>80 dB
Power Required:	>15 Vpp into 50 Ohms 28
AST Pulse:	28 V at 100 mA
AST Trigger:	-24 Volt, 0.4 microseconds into crystal
Completely enclosed crystal for RFI/EMI Immunity	< 2 Volts at preamplifier output (power)

Physical Specifications:

Temperature (°C):	-45 to +80 (-25-80 for AST)
Shock Limit (g):	500
Case material:	
Face material:	Stainless steel (304) Ceramic
Grounding:	Case grounded and isolated from mounting surface
Connector type:	BNC
Connector location:	Side (TC option provides a Top mount connector)
Directionality (dB):	±1.5
Seal type	Epoxy
Pressure:	<400 psi hydrostatic pressure

Model Related Specifications	Sensor Model				
	R6I	R15I	R30I	R50I	WDI
Sensor drive capability (w/RG-58 AU cable)	up to 3000 ft. (1000 m)	up to 1000 ft. (300 m)	up to 500 ft. (160 m)	up to 300 ft. (100 m)	up to 300 ft. (100 m)
Dimensions (dia. x ht. (mm)	29 x 40	29 x 31	29 x 31	29 x 30	29 x 30
Dimensions (dia. x ht. (in.)	1.13 x 1.6	1.13 x 1.23	1.13 x 1.23	1.13 x 1.16	1.13 x 1.16
Weight (gm)	98	70	75	70	70
Peak sensitivity Ref V/m/s)/[Ref V/mbar]	120† [-26]*	109† [-24.5]*	98† [-24]*	86† [-28]*	87† [-28]*
Operating frequency range (kHz)	40–100	70–200	125–450	300–550	100–1000
Resonant frequency (kHz)[1]	50† [90]*	125† [153]*	225† [350]*	320† [500]*	125† [500]*

NOTE 1: † Denotes response to plane waves (angle of incidence normal to face of sensor).
* Denotes response to surface waves (angle of incidence transverse or parallel to face of sensor).

5. PREAMPLIFIER INTRODUCTION

Physical Acoustics has a wide range of preamplifiers for use with our systems. There is a need for different types of preamplifiers due to different applications, specific environmental needs and cost constraints. Below is a short description of each preamplifier family in PAC's line of preamps. Following that is a specification sheet and additional information regarding each type.

2/4/6 Preamplifier Family: The 2/4/6 preamplifier family includes the 0/2/4 (meaning gain ranges of 0dB, 20 dB and 40 dB) and 2/4/6 (meaning 20 dB, 40 dB and 60 dB gain ranges). Other family members include the 0/2, 2/4 and 4/6 preamplifiers. This family of preamplifiers is meant to replace the industry's most famous preamplifier, the 1220A. This is our premiere preamplifier and is meant for laboratory use when the customer is not sure about the gain that his/her application will need or the frequency bandwidth. These preamplifiers were designed to be used with all available AE systems that have their power supplied via the output signal BNC. Provided with three selectable gain settings (switch selectable), this preamplifier operates with either a single-ended or differential sensor. Plug-in filters provide the flexibility to optimize sensor selectivity and noise rejection. These filters are supplied in the Low Pass (LP), High Pass(HP) and Band Pass (BP) configurations, and offer constant insertion loss for easy filter swapping without the need for recalibration. Auto Sensor Test (AST) allows the sensor to characterize its own condition, as well as

send out a simulated acoustic emission wave that other sensors can detect. There's also a "C" version available.

1220 Series Preamplifiers: PAC's family of 1220 Preamplifiers offers the versatility of interchangeable filters for matiching different sensors and dealing with diverse noise environments. Low noise, outstanding dynamic range and superior techniques for avoiding the pickup of EMI are the cornerstones for PAC's long-standing leadership in this vital area. The family of 1220 Preamplifiers features single and differential input, switchable 40/60 dB gain and replaceable bandpass filters with values from 10 kHz to 1.5 MHz.

There are three versions of the 1220 Preamplifier: the **1220A** is powered by +28 volts, which uses the single BNC for both power and singal. This model has been replaced with the 0/2/4 and 2/4/6 family of preamplifiers. However, if there is need for this preamplifier to match those already in use, PAC is happy to supply it.

The **1220B** is powered by a separate +/-15 volt source. This uses a BNC connector for signal output and a Lemo connector for power input.

1220C also separates the power input from the signal output . It uses two separate BNC connectors, one for 28 volt power and one for signal output.

In-Line "IL" Series Preamplifiers: The In-Line series of preamplifiers are small square x 2.2" long), low cost preamplifiers, that are available for those applications where there is a known specific preamplifier requirement. These preamplifiers have a fixed gain (0, 20, 40 or 60 dB), fixed frequency bandwidth (various filters are available) and specific sensor input connection (single or differential), all which are specified at the time of purchase. The result is a very small, simple (just two connectors) and lower cost preamplifier that is easy to install and use.

1222 Charge Preamplifier: A charge preamplifier is used in cases where there is a need for long lengths of sensor input cable. Charge preamplifiers do not suffer from distance/attenuation effects like a voltage preamplifiers do. They maintain the signal amplitude regardless of distance from the passive sensor to the preamplifier. Our 1222A Charge Preamplifiers work with our entire range of single ended sensors and feature (internally) selectable 40/60 dB gain, standard PAC Pluggable filters with bandwidths of 20 - 600 kHz and built-in test signal and control. They are directly compatible with all PAC systems using the single Power/signal AE input BNC connection.

1225IS Intrinsically Safe Preamp/Sensors/Barriers: The 1225IS family of components are used in hazardous, gaseous environments that require chass IIC, Intrinsically safe (IS) apparatus. They are a direct replacement for the Physical Acoustics standard line of Sensors and 1220A preamplifiers. The IS sensors (R6-IS, R15-IS and RWD-IS) and the preamplifier (1225A) are designed and certified for use within the

hazardous area, while the barrier (1225B) is attached to the preamplifier and is installed outside the hazardous area where it is connected to the AE instrument. Therefore, this series of sensor and preamplifier is used when the AE system can be installed outside the hazardous area. The 1225A IS preamplifier must be used in combination with the listed IS sensors and 1225B barrier. It features 20/40 dB selectable gain, pluggable High Pass and Low Pass filters and operates with PAC's standard single Power/Signal BNC.

1227 Series Preamplifiers: This family of preamplifiers offers 20 dB AE signal gain and very low power operation (3 milliamp typical). The 1227A is designed for standard 50 Ohm AE systems while the 1227B is designed for 600 Ohm AE systems. Both models use PAC's standard single Power/Signal BNC. These preamplifiers are very small (~ 0.7" square by 2.5" long) and low cost.

1227WT Preamplifier: The PAC 1227WT preamplifier offers 20dB AE signal gain like the 1227A with the exception that it operates in a wide temperature range of -47°C to +175°C. Also there is an optional "pulse Through" sensor calibration capability.

5.1 0/2/4 & 2/4/6 Preamplifiers

5.1.1 Description

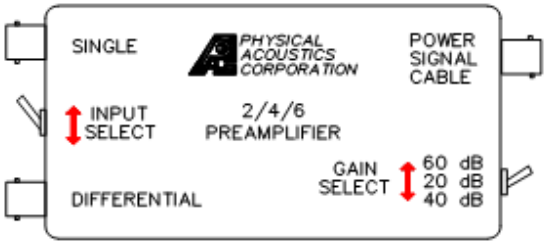


Figure 2. 2/4/6 Preamplifier

The 0/2/4 and 2/4/6 pre-amplifiers were designedto be used with all available AE systems that has its power supplied via the output signalBNC. The 0/2/4 is supplied with0/20/40 dB gain (switch selectable) while the 2/4/6 is supplied with20/40/60 dB gain. These pre-amplifiers operate with either a single ended or differential sensor. Plug in filters provide the user with flexibility to optimize sensor selectivity and noise rejection. These filters are provided in the Low Pass (LP), High Pass (HP), and Band Pass (BP) configurations, and offers constant insertion loss for easy filter swapping without the need for recalibration. Automatic Sensor Test (AST) is supplied as an option. This option provides the sensor with the ability to characterize its own condition as well as send out a simulated acoustic emission wave that other sensors can detect.

5.1.2 0/2/4 and 2/4/6 Specifications

ElectricalSpecifications:

- Gain Selectable: 0/2/4 - 0/20/40 dB + 0.5% dB
  2/4/6 - 20/40/60 dB + 0.5% dB
- Input Impedance: 10kQ // 15pF
- Power Required: 18-28Vdc
- Operating Current: 30mA (With AST Installed)
  28mA (Without AST Installed)
- Dynamic Range: 75dB (Utilizing an R15 Sensor)
  80dB (50Q Input)

Environmental Specifications:

Temperature: - 40° C to + 65°

Physical Specifications:

5 1/2in(L) x 2 3/8(W) x 1 3/8(H)
13.97cm x 6.03cm x 3.49cm
Weight: 0.45lb (205grams)

2/4/6 Gain Related Specifications:

Gain Selection	20dB	40dB	60dB
Bandwidth (-3dB):	10kHz-2.5MHz	10kHz-2.0MHz	10kHz-900kHz
Output Voltage (50Ω Load):	20Vpp	20Vpp	6Vpp
CMRR (500kHz):	42dB	42dB	42dB
Noise(RMS rti):			

Filter Frequency Response Hz	20dB *With R15 Sensor*	40dB *With R15 Sensor*	60dB *With R15 Sensor*	20dB *Input Shorted*	40dB *Input Shorted*	60dB *Input Shorted*
135k-185k	3 µV	1.4 µV	1.5 µV	2.0 µV	1.0 µV	0.42 µV
100k-300k*	3 µV	1.8 µV	1.8 µV	2.3 µV	1.0 µV	0.8 µV
10k-2.0M	5 µV	4 µV	3 µV	4 µV	3 µV	2.5 µV

*Standard filter

0/2/4 Gain Related Specifications:

Gain Selection	0dB	20dB	40dB
• Bandwidth (-3dB):	10kHz-2.5MHz	10kHz-25MHz	10kHz-800kHz
• Output Voltage (50Ω Load):	3Vpp	20Vpp	20Vpp
• CMRR (500kHz):	29dB	29dB	28dB
• Noise(RMS rti):			

Filter Frequency Response Hz	0dB *With R15 Sensor*	20dB *With R15 Sensor*	40dB *With R15 Sensor*	0dB *Input Shorted*	20dB *Input Shorted*	40dB *Input Shorted*
135k-185k	20 µV	4.8 µV	3.5 µV	20 µV	4.3 µV	2.7 µV
100k-300k*	20 µV	6.2 µV	5.2 µV	20 µV	5.8 µV	4.5 µV
10k-2.0M	30 µV	19.5 µV	11 µV	30 µV	19 µV	10 µV

5.1.3 Installation and Operation

The 0/2/4 and 2/4/6 use similar pluggable filters as the 1220A. Please refer to section 5.7 for standard filter values available for this preamplifier, however, use part number "2-14-40" rather than "1220A" when specifying filters for this family. Also refer to the section 5.7 of the 1220A preamplifier documentation for installation of filters as well as preamplifier installation.

5.2 In-Line Differential Preamplifiers (IL-XX-D)

5.2.1 Description

The Inline Differential Preamplifier was designed to be used with all available AE systems that has its power supplied via the output signal BNC. These preamplifiers are small compact, low noise differential preamplifiers (for use with differential sensors only), with fixed gain and fixed filter bandwidths. On applications where the user knows the specific bandwidth and gain required, these preamplifier soffer the most compact, low noise, low cost solution. Several different gain models are available including 0 dB gain (model IL-D), 20 dB (IL-20D), 40dB gain (IL40D) and 60dB gain (IL60D). It has an active filter built in and optimized sensor selectivity and noise rejection. Various filter values are available and are specified at the time of the purchase. Automatic Sensor Test (AST) is supplied as an option. This option provides the sensor with the ability to characterize its own condition as well as send out a simulated acoustic emission wave that other sensors can detect.

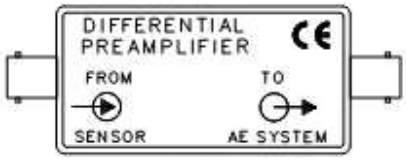


Figure 3. In-Line Differential Preamplifier

5.2.2 Specifications

PhysicalSpecifications:

- 3.25in.(L) x 1.13in.(W) x 0.86in.(H)
  (8.26cm x 2.87cm x 2.22cm)
- Weight: 0.12lb (54 grams)

ElectricalSpecifications:

- Gain : 0, 20, 40 and 60 dB + 0.5% dB
- Input Impedance: 10kQ // 15pF
- Power Required: 18-28Vdc
- Operating Current: 30mA (With AST Installed)
  28mA (Without AST Installed)
- Dynamic Range: 80dB (Utilizing an R15 Sensor)
  90dB (50Q Input)

EnvironmentalSpecifications:

Temperature: - 40° C to + 65° C

	IL-D	IL-20D	IL40D	IL60D
· Gain	0 dB	20 dB	40 dB	60 dB
· Output Voltage (50Ω Load):			15Vpp	15Vpp
· CMRR (500 kHz):			50 dB	50 dB
· Noise(RMS rti):			2 μV	2 μV

5.2.3 Standard Filters

Filters for the In-line differential preamplifiers are installed at the factory. Filter values must be specified at the time of purchase. The following are the standard available filter bandwidths for the In-Line differential preamps.

20 – 100 kHz	20 – 1000 kHz	50 – 500 kHz	100 – 300 kHz
100 – 1200 kHz	135 – 185 kHz	250 – 350 kHz	400 – 1000 kHz

Contact the factory for values other than those listed above.

5.2.4 Installation and Operation

Installation of the In-line differential sensors are very easy since there are only two connectors to connect and no configuration switches. Simply connect a differential sensor to the input of the of the preamplifier and connect the output of the preamplifier to the AE system channel input.

5.3 In-Line Single Ended Preamplifiers (IL-40S)

5.3.1 Description

The Inline Single Preamplifier is the lowest cost preamplifier in PAC's preamplifier line. It has been designed to be used with single ended sensors only and has a fixed gain of 40 dB (model IL-40S). It was designed to be used with all available AE systems that has its power supplied via the output signal BNC. It has "light" band pass filtering to optimize sensor selectivity and noise rejection. Automatic Sensor Test (AST) is supplied as an option. This option provides the sensor with the ability to characterize its own condition as well as send out a simulated acoustic emission wave that other sensors can detect.

Figure 3. In-Line Differential Preamplifier

5.3.2 Specifications

Physical Specifications:

- 3.25in.(L) x 1.13in.(W) x 0.86in.(H)
  (8.26cm x 2.87cm x 2.22cm)
- Weight: 0.12lb (54 grams)

Electrical Specifications:

• Gain:	40 dB + 0.5% dB (Fixed) 10kQ // 15pF
• Input Impedance: - Input type:	Single ended inputs (signal and ground)
• PowerRequired:	18-28Vdc
• OperatingCurrent:	22mA (With AST Installed) 20mA (Without AST Installed)
• DynamicRange:	>80dB (Utilizing an R15 Sensor)
• Output Voltage (50Q Load):	15Vpp
• Noise(RMS rti):	<2 |aV

Environmental Specifications:

Temperature: - 40° C to + 65° C

5.3.3 Standard Filters

Filters for the In-line single ended preamplifiers are installed at the factory. Filter values must be specified at the time of purchase. The following are the standard available filter bandwidths for the In-Line single ended preamps.

15 - 65 kHz	30 - 165 kHz	100 - 450 kHz	215 - 490 kHz
350 - 650kHz	32 - 1100 kHz		

Contact the factory for values other than those listed above.

5.3.4 Installation and Operation

Installation of the In-line single ended preamplifiers are very easy since there are only two connectors to connect and no configuration switches. Simply connect a single ended sensor to the input BNC of the of the preamplifier and connect the output BNC of the preamplifier to the AE system channel input. Be careful not to reverse the connections as damage may occur.

5.4 1222 Charge Preamplifiers

5.4.1 Introductionto Charge Preamplifiers

Both voltage preamplifiers and charge preamplifiers can be used in AE applications. The voltage preamplifier is more stable, and easier to use then the charge preamplifier, but the charge preamplifier has some features that make it more desirable for certain applications.

The charge preamplifier has a distinct advantage with long lengths of input cable between the sensor and the preamplifier. For the example where a sensor coax cable length needs to be e.g. 50 meters, the voltage preamplifier (1220A) has a 17 dB loss in signal amplitude, where as the charge preamplifier has no loss in signal amplitude. This has been tested with an R15 sensor with a lead break from a 0.3 mm Pentel mechanical pencil.

The noise of a charge amplifier is slightly larger then the voltage amplifier due to the addition of an additional charge conversion stage. Also the length of cable affects the noise.

With a 3' input cable the Signal to Noise Ratio (S/N) of a charge amp is 5 dB smaller then the voltage amp. With a 150' input cable the signal to noise ratio of the charge amp and voltage amp is the same. The charge amplifier has the advantage in that the signal amplitude is unchanged.

5.4.2 1222 Preamp Description

The figure shows the outline of the 1222 Charge Preamplifier. It has 3 single ended BNC connectors for use with Co-axial cables. The pre-amp accepts inputs from PAC and other single ended AE piezoelectric sensors anywhere in the frequency range of 20 - 600 kHz. The following is a description of each of the connections.

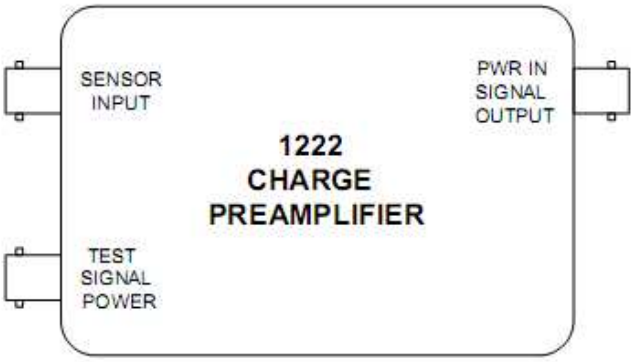


Figure 5. 1222 Charge Preamplifier

Sensor Input.
This is the input from the AE single ended sensor. The sensor cable is connected to this connector.

Power In/Signal Out.
The Power In/Signal Out connection supplies 28 volts DC power from the AE Main unit to the pre-amplifier. Also on the same center conductor is the amplified AE signal output for processing by the AE Main unit. This is accomplished by "floating" the AE signal on the DC voltage.

Test Signal Power
The Test signal power BNC connection allows for the user to initiate a pre-amp/system test by applying a 12 volt DC level to this input. Upon application of this voltage, a relay is energized inside the pre-amp that disconnects the AE sensor from the input of the pre-amp and connects a signal generator with a known voltage into the input. Applying a known signal level at the input of the pre-amplifier allows the user to monitor the entire amplification chain in the main unit thereby insuring that the AE system circuitry is functioning.

Other important features of this pre-amplifier include the following:

- 40 - 60 dB internal gain selection. Factory default set at 40 dB.

  Uses PAC pluggable Band Pass filters for a narrower frequency response which further enhances Signal to Noise and filters out unwanted lower frequency vibrations. See 1220A

5.4.3 Specifications

Gain:	100mV/pF & 1000mV/pF (set by internal jumper) (equivalent to 40 - 60 dB gain)
Bandwidth (-1dB)	20K-600kHz
RMS Noise (RTI):	<10 µV
Dynamic Range:	80 dB
Maximum Output:	16 Volts peak to peak into 50 Ohms
Quiescent Current:	35 mA
Filter Module:	Requires standard PAC Passive Filters
Gain Accuracy:	+/-1dB
Test Signal:	Constant Sine Wave (1MHz Bandwidth) 0.5V-P Maximum Amplitude (set at 150 kHz)

5.4.4 Installation and Operation

Installation of the 1222 Charge Preamplifier is identical to that of any other typical preamplifier. Attach the single ended sensor to the signal input of the preamplifier. Then connect the Power In/Signal Out BNC to the AE system via a co-ax cable. For the test signal, connect a switched 12 volt power source to the Test signal input. Whenever power is applied, a relay will switch the sensor input to the output of a signal generator and the signal generator signal will be amplified by the preamplifier and sent to the AE system for determination if the preamplifier gain or performance has changed.

The 1222 Charge preamplifier uses the standard 1220 family of pluggable filters. Refer to section 5.7 for specific information relating to the selection and installation of filters in this preamplifier.

5.5 1227A & 1227B Preamplifiers

5.5.1 Description

This family of preamplifiers offers 20 dB AE signal gain and very low power operation (3 milliamp typical). The 1227A is designed for standard 50 Ohm AE systems while the 1227B is designed for 600 Ohm AE systems like the PAC 4610. It has been designed to be used with single ended sensors only and has a fixedgain of 20 dB. Several filter bandwidths are available and must be specified at the time of purchase. Both models use PAC's standard single Power/Signal BNC. These preamplifiers are very small (~ 0.7" square by 2.5" long) and very low cost.

5.5.2 Specifications:

Parameter	**1227A**	**1227B**
Output Impedance	50 Ohms	600 Ohms
Gain	20 dB ± 1dB	20 dB ± 1 dB
Noise (|a Volts RTI):	4 |aV	4 |aV
Maximum Voltage Output (Vp-p):	5 Vp-p	1.4 Vp-p
Dynamic Range:	95 dB	84 dB
Supply Voltage Range:	9 - 28 Volts	7 - 28 Volts
Supply Current:	3 mA @ 12 Volts	3 mA @ 12 Volts

Maximum Operating Temperature:	0°C - 85°C
Preamp Dimensions:	3.4" Long x 0.687" wide x 0.687" high (8.64 cm long x 1.75 cm wide x 1.75 cm high)

5.5.3 Standard Filters

Filters for the 1227 series, single ended preamplifiers are installed at the factory. Filter values must be specified at the time of purchase. The following are the standard available filter bandwidths for the 1227 preamps.

30 - 200 kHz 60 - 400 kHz 150 - 600 kHz 220 - 900 kHz

Contact the factory for values other than those listed above.

5.5.4 Installation and Operation

Installation of the 1227 single ended preamplifiers are very easy since there are only two connectors to connect and no configuration switches. Simply connect a single ended sensor to the input BNC of the of the

preamplifier and connect the output BNC of the preamplifier to the AE system channel input. Be careful not to reverse the connections as damage may occur.

5.6 1227WT High TemperaturePreamplifier

5.6.1 Description

The Wide Temperature Preamplifier was designed to be used in very extreme temperature environments. It is for use with all available AE systems that has its power and output signal on the center conductor. Both input and outputs of the 1227WT utilize SMA type connector (BNC's are optional). The preamplifier is built in a narrow diameter stainless steel tube for reliability and ruggedness. It is supplied with 20 dB gain and operates with a single ended sensor (only). Pulse through Sensor Testing provides the ability to allow a pulse to travel from the AE system through the preamplifier to the sensor. The magnitude of the impulse going through the preamplifier can be up to 200 volts.

5.6.2 SpecificationsEnviron

mentalSpecifications:

Temperature:	- 47°C to + 175°C **(** -50°F - +350°F)
Vibration:	>40 G @ 0 - 2 kHz
Shock:	> 5G 5 - 20 msec.

Electrical Specifications: @ - 47° C to + 175° C **(** -50° F- +350 °F):

• GainSelectable:	20 dB + 1 dB
• Bandwidth(-3dB):	<40kHz to >1.2 MHZ
• Input Impedance:	10kQ // 15pF
Voltage Required at Power/Signal Connector: (In normal ambient temperature environment)	18-24 VDC
Recommended Operating Voltage: (For maximum dynamic range over full temperature)	22-23 VDC
Operating Current:	< 35 mA (With Pulse through relay)
Dynamic Range:	75 dB (Utilizing an R15 Sensor) 80 dB (50° Input)
Output Voltage (50Ωload):	2Vpp into 50°
Noise w/R15 (RMS rti):	< 75 μV (20°C/68°F)

Physical Specifications:

Length Diameter	4.25 inches (10.8 cm.)
Bandwidth	0.75 inches (1.9 cm)
Weight	0.16 lbs. (73 grams)
Connector	SMA type

5.7 1220A, 1220B, 1220C Preamplifiers

The Physical Acoustics 1220X Series is a versatile line of low-noise cost-effective preamplifiers. They were developed for use with Acoustic Emission (AE) systems in production and laboratory applications and their circuits were designed with the latest in low noise and high reliability components. The preamplifier gains its versatility by allowing the user to select high pass, low pass, or bandpass filters, single-ended or differential input, 40 dB or 60 dB gain, and choice of three output/power configurations.

The 1220A output and power is supplied by a single conductor 50 Ohm coaxial cable with a BNC connector (PAC Model 1234). The +28 VDC operating voltage and signal run on the same line and are internally isolated in the preamplifier. A variant of the 1220A which is the 1220A-AST is externally, connection and powerwise identical to a 1220A except that a special AST (Auto Sensor Test) circuit has been added to provide a -25 volt pulse directly to the sensor attached to the preamp input when the +28 volt power is momentarily interrupted. Several PAC systems such as SPARTAN 2000, MISTRAS, DiSP and LAM have the capability built in to create an AST pulse in this manner. This capability is advantageous in multiple channel situations for determining the sensor response, coupling efficiency and distance from another pulsing
sensor.

In the 1220B preamplifier, the output and power run on separate cables. The preamplifier is powered by +/- 15 VDC. A 1234 cable is used for the output and the power cable is a PAC Model 1233.

In the 1220C preamplifier, the output and power are also run on separate cables, but the preamplifier uses a single-ended power supply (+28 VDC). A PAC 1234 (BNC-BNC) cable is used for the output while another PAC 1234 (or PAC 1234A, BNC to pigtail) is used for the power connections.

Below is a table showing the different values of high pass, low pass, and band pass filters available for these preamplifiers.

STANDARD PLUG-IN FILTERS

HIGH PASS		BAND PASS		LOW PASS	
PART #	FREQUENCY	PART #	FREQUENCY	PART #	FREQUENCY
1220-3H	3 kHz	1220-20-100BP	20-100 kHz	1220A-400L	400 kHz
1220-20H	20 kHz	1220-50-200BP	50-200 kHz		
1220-50H	50 kHz	1220-100-300BP	100-300 kHz		
1220-100H	100 kHz	1220-100-1200BP	100-1200 kHz		
1220-200H	200 kHz	1220-200-400BP	200-400 kHz		
1220-300H	300 kHz	1220-300-600BP	300-600 kHz		
1220-400H	400 kHz	1220-400-600BP	400-600 kHz		
1220-500H	500 kHz	1220-600-1200BP	600-1200 kHz		
1220-600H	600 kHz	1220-BP-SYS	No Filtering		

5.7.1. Specifications of the 1220 Series Preamplifiers

Environmental Specifications:

Specifications apply at 25° ± 5° C
Preamplifiers will operate from 0° to 50° C

Electrical Specifications:

Gain:	40 or 60 dB (Switch selectable)
Bandpass:	User selectable from 10 kHz to 1.2 MHz
Input:	Single or differential selectable
Input Impedance:	10 k Ohms in parallel with 15 pF
Output Voltage:	>15 Vpp into 50 Ohms
Dynamic Range:	85 dB
CMRR (500 kHz):	55 dB
Noise (RMS RTI):	<2 µV (input shorted)
Power Requirements:	1220 A, C - +28 VDC 1220B - ±15 VDC
DC Standby Current:	25 mA

Physical Specifications:

Dimensions:	5.25" Long x 2.25" Wide x 1.38" High (13.3 cm) x (5.72 cm) x (3.5 cm)
Weight:	0.55 lb. (0.25 kg)

5.7.2. 1220 Preamplifier Description

Single Ended Connector — Connects an external single ended sensor (PAC R, |i, W, or T series or equivalent piezoelectric transducer) to the 1220 preamplifier via an industry standard single ended BNC connector.

AE Input Select Switch — Selects what mode input is being connected to the 1220 preamplifier. When the switch is positioned toward the differential connector, this means that the 1220 is connected to amplify a differential signal.

AE Differential Input Connector — Connects an external differential sensor (PAC RD, | D, WD, or TD series or equivalent piezoelectric transducer) to the 1220 preamplifier via differential BNC connector.

Power Signal Cable — Output signal and power (+28 VDC) are both present on this line. Both signals are isolated internally. Cable connects via an industry standard BNC connector (PAC 1234 cable).

Gain Select — A total preamplifier gain of 40 dB (x100) or 60 dB (x1000) is selected by this switch.

Output — Output signal is present here. Cable connects via a standard BNC connector (PAC 1234

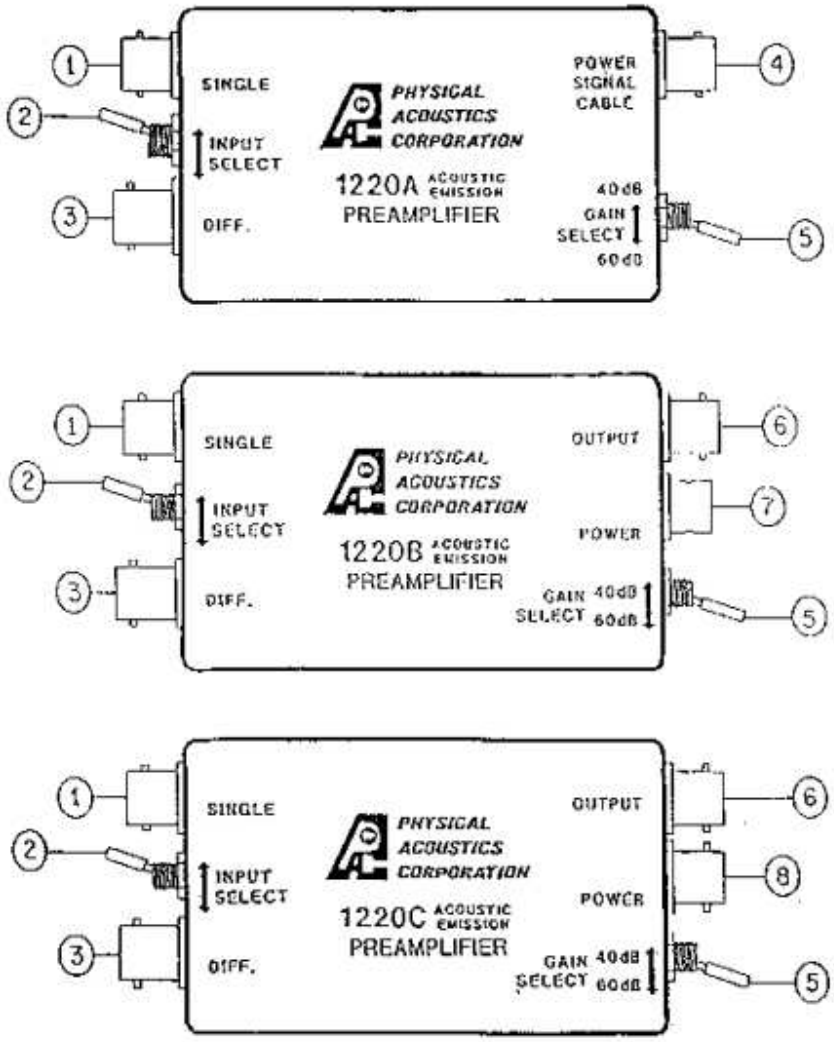


Figure 6. 1220 A, B, C External Connections/Controls

Power — +15 VDC is connected to the preamplifier here via a multipin connector. Use PAC cable #1233 or #1233A.

Pin #1 - Ground 1
Pin #4 - (-15) Volts (Green Lead on 1233 Cable) Pin #7 - (+15) Volts (Red Lead on 1233 Cable)

Note: When using a 1220B preamplifier with a normally supplied 1233 power cable, no ground connection is made through the cable. Only a shield is provided in order to prevent possible ground loop problems (increased noise in the system). The ground is made through the shield or ground of the Output BNC connection (1234).

Power — (+28) VDC is connected to the preamplifier here via a standard BNC cable (PAC #1234 or #1234A).

Figure 7 shows wiring connections of the preamplifiers. Look up the corresponding number that describes the connection or control.

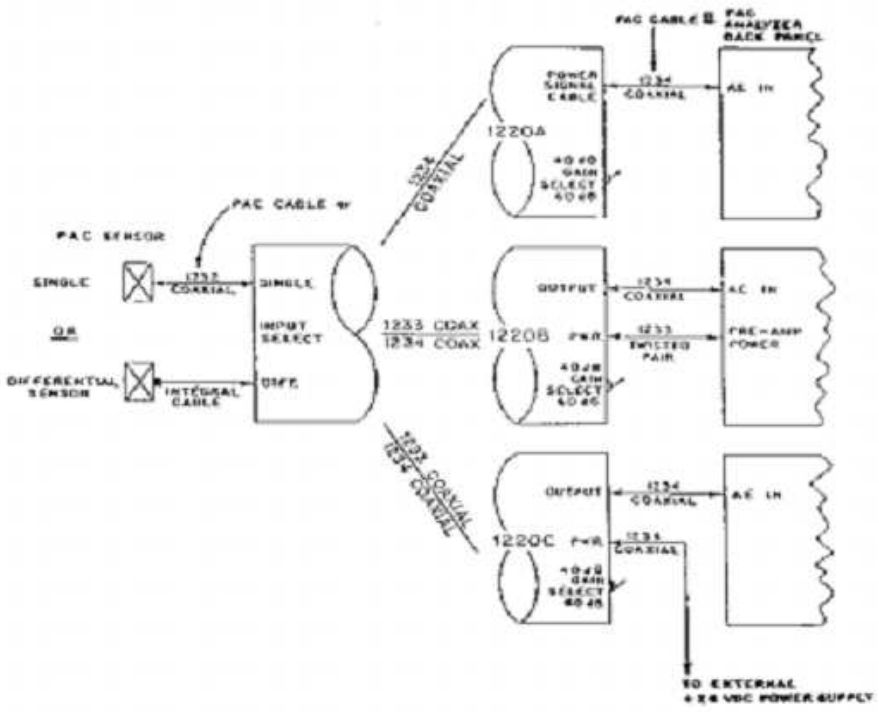


Figure 7. 1220 Wiring Connection

Operation and cable hookups differ only slightly for each version of the preamplifier. Input hookups are identical for the 1220A, B, C (Figure 7), while output connections require a different configuration.

5.7.3. Preamplifier Installation and Operation

1220A Installation and Operation

1. Connect a 1234 BNC to BNC signal cable from the preamplifier "Output" to the jack marked "AE IN" on the analyzer.
2. Select the AE input desired (single or differential).
3. Attach the appropriate sensor and cable to the preamplifier input connector (single or differential).
4. Turn system power on to energize the preamplifier.

1220B Installation and Operation

1. Connect a 1233 power cable from the 1220B connector labeled "Power to the PAC analyzer connector labeled Pre-Amp Power."
2. Connect a 1234 BNC to BNC cable from the preamplifier connector "Output" to the one on the analyzer labeled "AE IN."
3. Select the AE input desired (single or differential).
4. Attach the appropriate sensor and cable to the preamplifier input connector (single or differential).
5. Turn system power on to energize the preamplifier.

1220C Installation and Operation

1. Connect a 1234 (or 1234A BNC to pigtail) cable from the 1220C connector marked "Power" to an external +28 VDC power supply.
2. Connect a 1234 BNC to BNC signal cable from the preamplifier connector "Output" to the one on the analyzer labeled "AE IN."

3. Select the AE input desired (single or differential).
4. Attach the appropriate sensor and cable to the preamplifier input connector (single or differential).
5. Turn the system and external supply power on to energize the preamplifier.

5.7.4. 1220 Series Filter Replacement

Filter placement on the 0/2/4, 2/4/6 and 1220A, B, and C are identical. To replace a filter, remove the four Phillips head screws from the bottom lid; this will expose the preamp's inner circuitry (Figure 8).

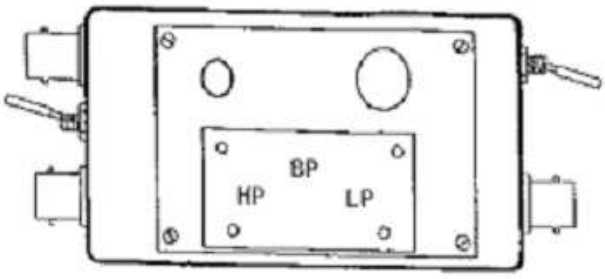


Figure 8. Internal Preamplifier Layout

The connections shown in Figure 9.should be made in order to by-pass (remove) filter in cases where the broadest possible bandwidth is desired.

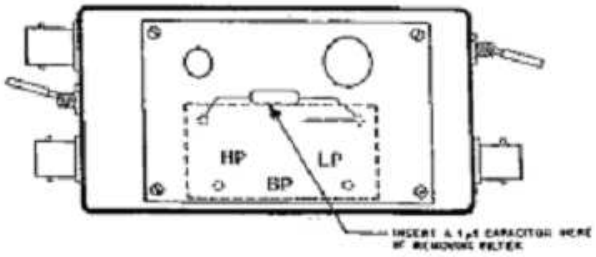


Figure 9. Removing and Bypassing a Filter Using a 1μF Capacitor

Figure 10.is a block diagram of the 1220 series preamplifier. Infernal circuitry for the 1220 A, B, C. is identical except for minor differences in the output and power distribution sections.

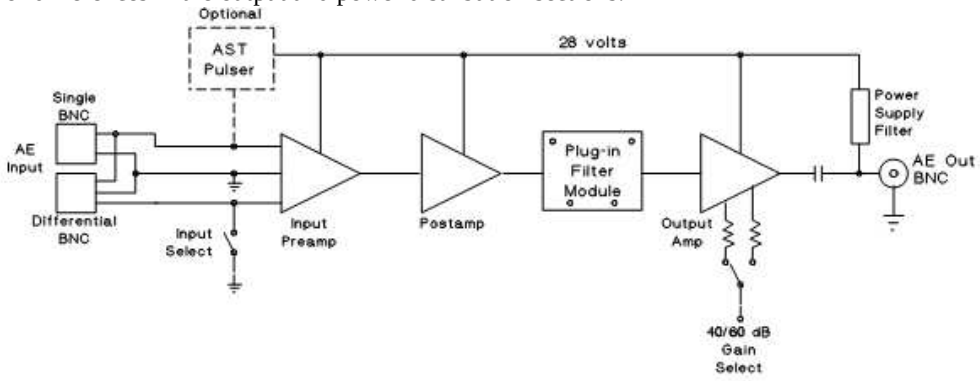


Figure 10. Preamplifier Block Diagram

Input Select — Input selection consists of a low noise differential amphifier for high gain, high common mode rejection and maximum sensitivity to low level input signals. This amplifier is then buffered by a 20 dB gain low output impedance post amplifier, which chives the PAC plug-in fifth order high pass, low pass and bandpass filters.
Gain Select — The output stage consists of a hybrid 20/40 dB gain high speed amplifier and a 50 Ohm output buffer for large power bandwidth while driving long cables. Two user adjustments are provided for calibration.

6. AUTO SENSOR TESTING

Auto Sensor Test (AST) is a unique and special capability that has been built within our SPARTAN 2000, MISTRAS, DiSP, LAM and PCI-8 systems. The AST feature allows our AE systems to control a pulser that is integral to PAC AST equipped preamplifiers and our Integral preamplifier sensors (with AST option). This allows for any AE channel to pulse the sensor, while the receiving electronics remains active. This means that the sensor can be used as a pulser and a receiver at the same time. It can therefore characterize its own condition as well as send out a simulated acoustic emission wave that other sensors can detect, thereby giving feedback as to the arrival time difference and the detection sensitivity of those nearby sensors. The other main important feature of this option is that it operates through the standard 1234 BNC cable which goes between the AE channel input and the preamplifier (and integral preamplifier sensor).

6.1 OtherAutomatic Sensor PulsingTechniques

Competing methods for sensor pulsing or automated testing in AE instruments involves the use of at least 2 relays for each channel, one in the AE system for each channel and one in each pre-amplifier. When the AE system decides to pulse the sensor, it turns on a relay in the AE instrument which removes pre-amplifier power and makes connection to a digital output which puts a voltage spike through to the pre-amplifier. A relay in the pre-amplifier de-energizes when power is removed from the pre-amp. This causes the relay contacts to make electrical connection to the sensor crystal directly, and remove the pre-amp output signals from the co-axial cable path. A voltage spike now goes directly to the sensor crystal. Upon pulsing, a simulated AE event is generated that is coupled to the structure in which that sensor was in contact. This causes other sensors that are close by to detect the simulated AE event. This data when processed by the AE system gives the user information about the quality of the sensors that have detected the event. When used often, the user can determine if there has been any sensor degradation during the AE test. Unfortunately this technique is inferior to Auto sensor testing for various reasons including the fact that it cannot be used in situations where only one sensor is involved as well as other reasons that will be discussed below.

6.2 AST Application and Advantages

PAC has improved on the automated pulsing method with a unique and different scheme we call Auto Sensor Test (AST). Our scheme keeps the pulsing sensor active immediately after pulsing. This offers the following advantages in characterizing the AE event response:

1. Reading the response from the same sensor that is being pulsed gives a quality measure of that given AE channel. This includes information on sensor, coupling pre-amplifier and AE system.
2. A single sensor can be evaluated whereas in the above relay based method, this is impossible.
3. The self pulsing/receiving method provides information on the coupling quality of the sensor to the structure, whether the sensor is even attached to the cable or if the cable is shorted.
4. Since the pulsing sensor receives the AE information, it is the first hit sensor. This gives exact "delta T" measurements from this sensor to each other that detects the event. This is useful in calibrating for location. It is also useful in performing measurements such as those used in Acousto-Ultrasonics where the change in flight time is an important feature.

The way that this is accomplished is simply by sending a pulse down the preamplifier cable to the preamplifier. If the amplifier is equipped with AST capability, it has a circuit that detects this pulse. When detected, this pulsing circuitry generates a pulse with a specific pulse shape that excites the AE sensor. Since AE sensors work equally well as pulsers or receivers, the pulse causes the AE sensor crystal to deform and generate shock waves that travels throughout the structure. These sound waves travel to sensors that are on the structure and reflect, even back to the orignial pulsing sensor. The pulsing sensor which immediately reverts to a receiving AE sensor at the end of the pulse, receives the structural response.
signals and they are processed as a typical AE hit or event. Other sensors on the structure also detect and process the event.

The main disadvantage to the AST method is the receiving of the "main bang". This saturates the peak amplitude response of the AE system so that the pulsing sensor always registers a ~100 dB amplitude, but since this is a high "Q" type response, all the other AE features remain very low in value from the main bang alone. In this way, energy, duration and counts becomes a very good parameter for monitoring the response of the pulse.

6.3 AST Requirements

In order to perform AST on an AE system the following are needed:

1. AST (Auto Sensor Test) circuitry in the AE system. This is built as standard within all PAC multi-channel AE systems including DiSP, MISTRAS, LAM, SPARTAN 2000.
2. Preamplifiers with AST option or Integral Preamplifier Sensors with AST Option,
3. (AST) Auto Sensor Test Software. This is built standard within all PAC multi-channel AE System software including DiSP, MISTRAS, LAM and SPARTAN 2000.

From the above it can be seen that AST circuitry and software is already built into most PAC systems and is immediately ready to be put to good use. The only item that may have to be purchased is the preamplifier with AST option or the Integral Preamplifier sensors with the AST Option. PAC sells AST options with its 0/2/4 and 2/4/6 preamplifiers, its In-Line Preamplifiers, and with the 1220A preamplifiers. It is also available with our Integral Preamp sensors such as the R15I-AST, R30I-AST, WDI-AST, etc. Please consult PAC for more information on closing the loop with our AST preamplifiers and integral sensors.

In terms of software, all PAC multi-channel software has multiple AST modes. AST can be performed before and after a test providing a graphical or line dump report. AST can even be performed during a test on a single sensor or all sensors to verify their integrity, all without affecting the AE test results. One additional mode with AST is the ability of saving a previous test to use as a comparison with a later AST test. In this way, a nice report is generated to indicate the statistical deviation from the "Trained" file and provide pass/fail information as a result. Consult your software manual for more information on the use of AST in PAC's multichannel AE systems.

7. 1224 SERIES REPEATER AMPLIFIER

7.1 Introduction

Physical Acoustics 1224 series repeater amplifiers are "in-line" driver amplifiers meant to restore the AEsignal level when driving long co-ax cables. The 1224 was developed for use with Acoustic Emission (AE) systems in production and laboratory applications. Its circuitry uses low noise and high reliability components. The 1224 series repeater amplifier has been specifically designed to compensate for signal losses over long cable lengths. It is used between the AE system and the AE preamp when cable lengths exceed 1000 feet. Therefore it is recommended that 1224's be used at spacing of 1000 feet.

7.2 Specifications

Typical specifications for the 1224 series repeaters are as shown below:

1224 Specifications @ 28 Volts

Gain:	10 dB min. or 20 dB max.
Frequency response (-3 dB):	1.6 kHz to 2.5 MHz small signal 1.6 kHz to 1.0 MHz large signal
Vpk-pk output (max):	8 Vpk-pk into 50 Ohms
Static current:	20–38 mA, depending on gain setting
Supply voltage:	14–28 Volts DC
Noise "RTI":	23 µV (No filter) 14 µV (with "100 kHz low" filter)

7.3 1224 Configurations/Designations

Feature Chart

	1224A	1224B	1224C	1224C-LF	1224D
Combined supply/ signal line	Yes	Yes	No	Yes, on differential BNC connector	Yes
Separate supply line	No	No	Yes	Yes*	No
External gain adjust	10 or 20 dB Fixed at 20 dB	None	10 or 20 dB	10 or 20 dB	0 or 20 dB
Internal gain adjust	3 to 20 dB	3 to 20 dB	3 to 20 dB	3 to 20 dB	3 to 20 dB
Frequency range	10 to 900 kHz	10 to 700 kHz	10 kHz to 1 MHz	1.6 kHz to 1 MHz	10 kHz to 1 MHz
Input	50 Ohm or 5 kOhm	50 Ohm or 5 kOhm	50 Ohm or 5 kOhm	50 Ohm or 5 kOhm	50 Ohm or 5 kOhm

*On the differential BNC Connector, one conductor is for power and the other for the AE signal. Please note that using this repeater requires different cabling and connectors on the 5600. The main advantage of using this repeater is in applications where a very low frequency operation is desired.

7.4 Operational Description of the 1224 Repeater Amplifier

The 1224 series repeater consists of a low noise preamplifier with an internally adjustable gain to compensate for filter losses. The output of the preamplifier drives a PAC plug-in filter module. The plug-in filter module can be replaced by removing the four Phillips head screws from the bottom lid. Various high-pass, low-pass and bandpass filter configurations are available to customize the 1224 frequency response. These are the same filters as indicated in the previous section. The filter output is then fed to the output stage. The output stage consists of a hybrid 10 or 20 dB gain high speed amplifier and a 50 Ohm output buffer for large power bandwidth while driving long cables.

The 1224 repeater amplifier can be installed by simply connecting the output of the repeater amplifier toward the jack of the analyzer marked "A.E. Input." The input of the 1224 amplifier should then be connected towards the sensor or preamplifier output. The external gain switch can then be used to control the amount of gain.

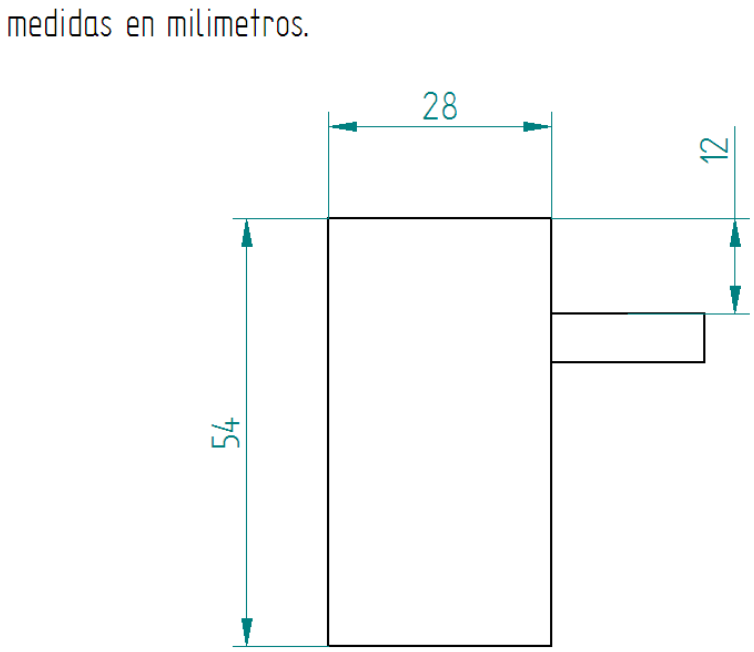
DESCRIPTION AND FEATURES: The WDIU-AST sensor is part of our integral preamplifier sensor family, featuring a wide-bandwidth frequency response at unsurpassed sensitivities, high signal to noise ratio and high EMI immunity (Double shielded) and integral 40 dB preamplifier for low noise amplification and long distance cable driving purposes.

APPLICATION: This is a wide band, high sensitivity sensor. It can be used in any application where wide frequency response is required, where frequency analysis of the AE signal is required and to identify the peak frequency range in the test structure.

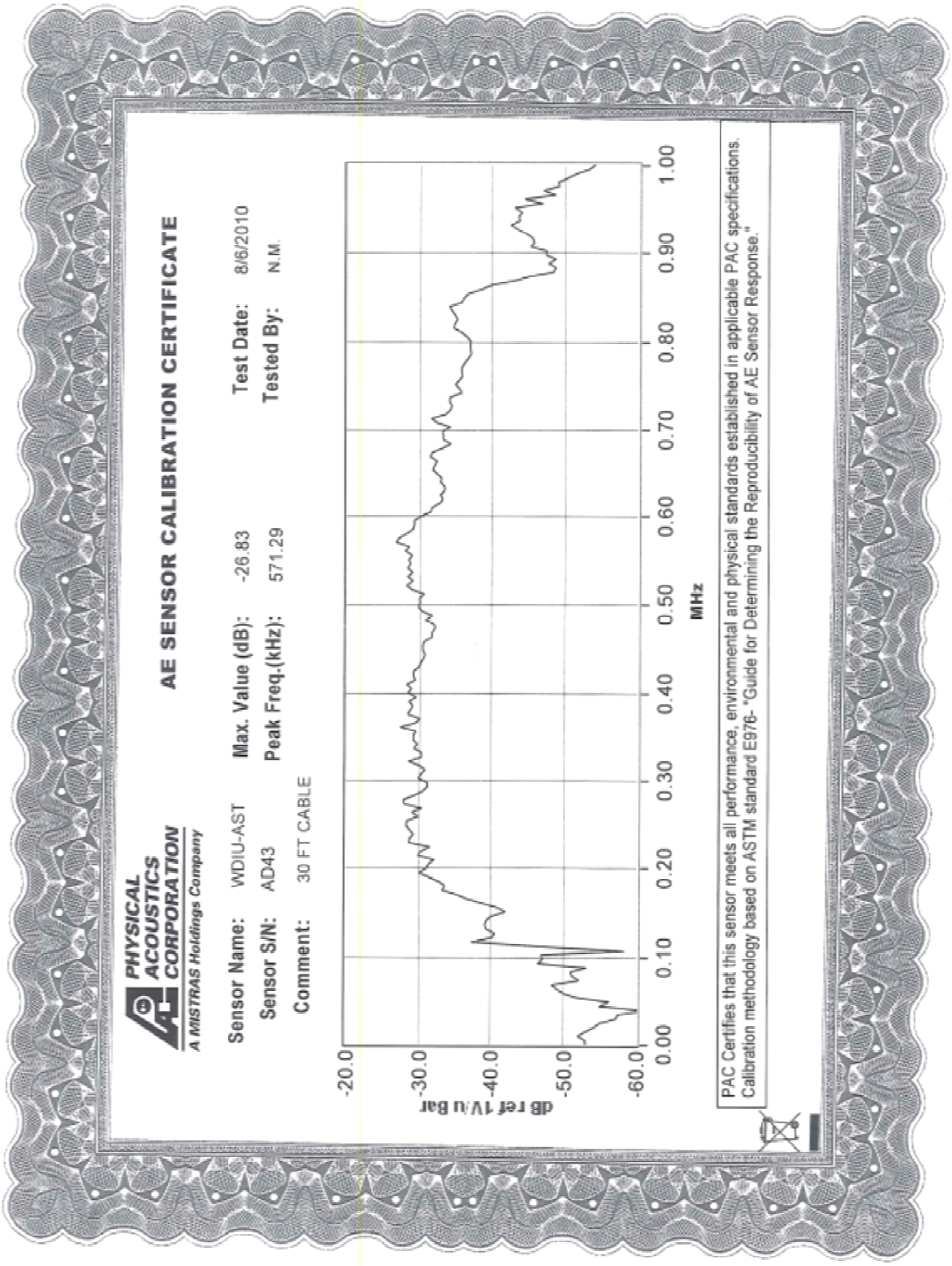
SPECIFICATIONS:

Diameter in. (mm)	WeightWithout Cable (g)	Operating T (°C)	Shock limit (g)	Case material	Face material	Connector[type]	Connectorlocation
SeeFig 1	~150	-45 to 85	?	Stainless Steel	Stainless Steel	Integrate Cable	side

Peak sensitivity Ref [V/mbar]	Operatingfrequencyrange(kHz)	Resonancefrequency (kHz)	Directionality (dB)	Grounding	Sealtype
-28 dB	200-800	230	+/- 1.5	The sensing element is completely grounded and isolated from mounting surface	Epoxy



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DEL SENSOR

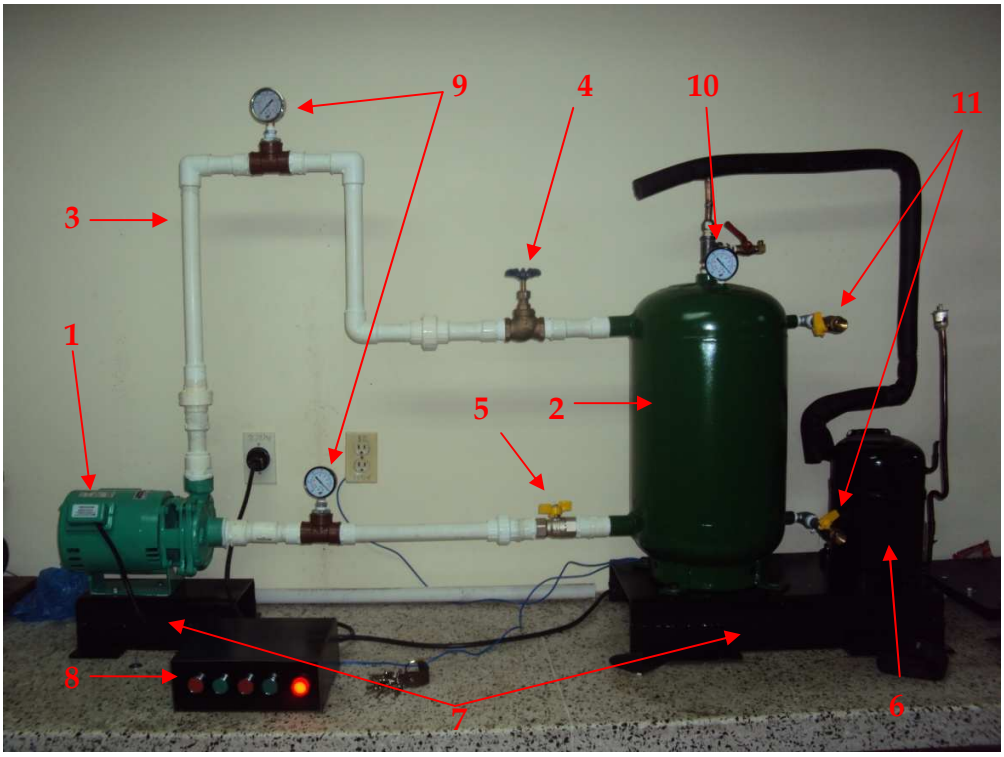


ANEXO D. MANUAL DE USUARIO DEL BANCO DE CAVITACIÓN

El banco está provisto por los siguientes elementos

1. Bomba centrífuga de ½ hp a 220 v marca Barnes.
2. Depósito.
3. Tubería de PVC de ½".
4. Válvula de globo en bronce para regulación de flujo a la entrada del depósito.
5. Válvula de bola a la salida del depósito.
6. Bomba de vacío de 1hp a 220 v.
7. Bases en lámina de ¼".
8. Tablero con circuito de arranque y parada de la bomba centrífuga y la bomba de vacío.
9. Manómetros.
10. Vacuómetro.
11. Válvula galvanizada para realizar nivel ubicado en la parte posterior del depósito.

Figura 1. Banco de cavitación por vació.



Fuente: Autores

1. LLENADO Y VACIADO DEL DEPÓSITO.

Es importante verificar por seguridad que el banco se encuentre desconectado y que sus partes eléctricas no tengan contacto alguno con el agua.
El circuito eléctrico es a 220 v.

Como es un circuito hidráulico cerrado para el llenado y vaciado del depósito se tiene que abrir la válvula de admisión de aire ubicados en la parte superior (*ver figura 2. Válvula de admisión de aire*.

Figura 2. Válvula de admisión de aire.

Fuente: Autores

Hay que tener en cuenta el volumen de agua que ocupa la tubería, accesorios y la bomba centrífuga, por eso antes de llenar y ajustar el nivel de agua en el depósito se debe verificar que las válvulas de globo y de bola (*ver figura 3. Válvula de globo y válvula de bola*), estén completamente abiertas, esto con la finalidad de que el nivel de agua en el depósito sea el correcto.

Figura.3. Válvula de globo y válvula de bola

Fuente: Autores

En el llenado del depósito, el nivel adecuado de agua se ajusta por medio de la válvula superior de ½" galvanizada ubicada en la parte posterior del depósito (*ver figura 4. Válvula superior para nivel*), para esto se procede abrir la válvula ya nombrada hasta que deje de salir agua, después de esto se procede a cerrar la válvula para que no se presenten fugas.

Figura 4. Válvula superior y válvula inferior

Fuente: Autores

Generalmente el depósito se llena una sola vez, pero encaso de mantenimiento, en el que se necesite retirar el depósito, se debe tener en cuenta lo siguiente:
Es muy pesado por su contenido de agua, para evitar lesiones, se proceden de la siguiente manera:

- verificar que las válvulas de globo y bola estén abiertas con el fin de vaciar el agua en la tubería.

- Abrir la válvula de admisión de aire.

- Abrir la válvula de ½" galvanizada ubicada en la parte posterior inferior del depósito.
- Abrir la válvula de ½" galvanizada ubicada en la parte posterior superior del depósito, para permitir mayor entrada de aire.

Para desconectar el depósito, el circuito hidráulico cuenta con uniones universales y uniones roscadas en la entrada y salida del depósito.
En cuyo caso no se quiere retirar el depósito, sino que otro elemento como la bomba o algún accesorio del circuito hidráulico, lo que se tiene que hacer es lo siguiente:

- Proceder a cerrar la válvula de globo y la válvula de bola (*ver figura 3. Válvula de globo y válvula de bola*).

- Antes de remover hay que tener en cuenta, que el circuito hidráulico (tuberías, bomba y accesorios), contiene agua, lo cual hace necesario conseguir un recipiente en el que se deposite toda esta agua.

- Se procede a soltar la unión universal inferior (*Figura5.*) y bajo esta colocar el recipiente para recoger todo el líquido.

- ya realizado lo anterior, se puede proceder a remover el elemento deseado.

2. Encendido y apagado de la bomba centrífuga y bomba de vacío.

El banco cuenta con un caja de control, con el cual se activan y se desactivan la bomba centrífuga y la bomba de vacío de forma independiente (*ver figura 5. Caja de control frontal.*).

Figura 5. Caja de control lado pulsadores.

Fuente: Autores

En la parte posterior del tablero de control se encuentra ubicados los fusibles (uno para cada fase) y el interruptor de encendido del tablero y en su parte frontal se encuentran los pulsadores de accionamiento de la bomba centrífuga y la bomba de vació marcados respectivamente y un indicador luminoso de color rojo, el cual indica que el circuito esta energizado (ver *figura 6. Caja de control trasera*).

Figura 6. Caja de control trasera.

Fuente: Autores

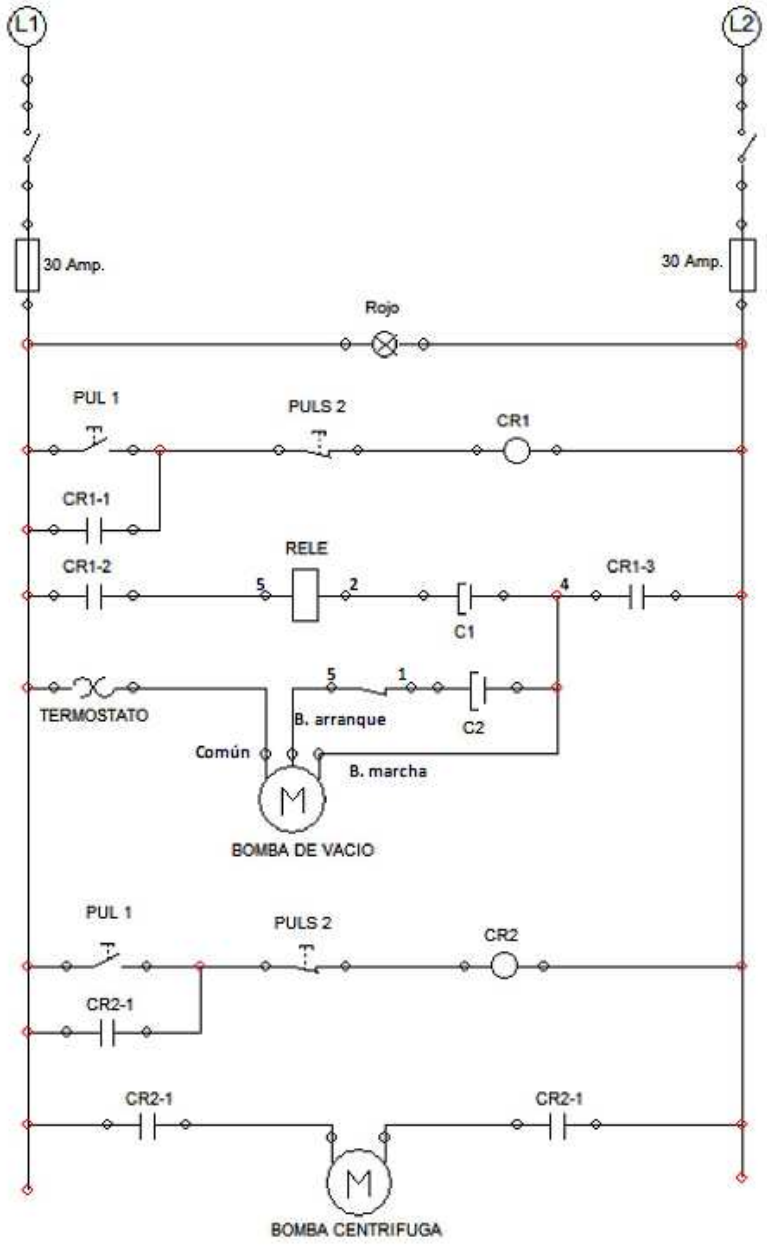
El manejo es sencillo, para el accionamiento y parada de la bomba centrífuga y la bomba de vació se tiene dos pulsadores uno verde (acción) y otro rojo (parada), para cada uno.

En tablero está constituido por un circuito lógico con los siguientes elementos:

- Dos contactores a 220 V.
- Un relé a 220 V.
- Dos pulsadores normalmente abiertos (verdes).
- Dos pulsadores normalmente cerrados (rojos).
- Dos condensadores.
- Dos porta fusibles con fusibles de 30 A.
- Un interruptor de doble fase.
- Un indicador luminoso led de 220V.

Conectados como se muestra en la *figura 7. Plano eléctrico.*

Figura 7. Plano eléctrico.



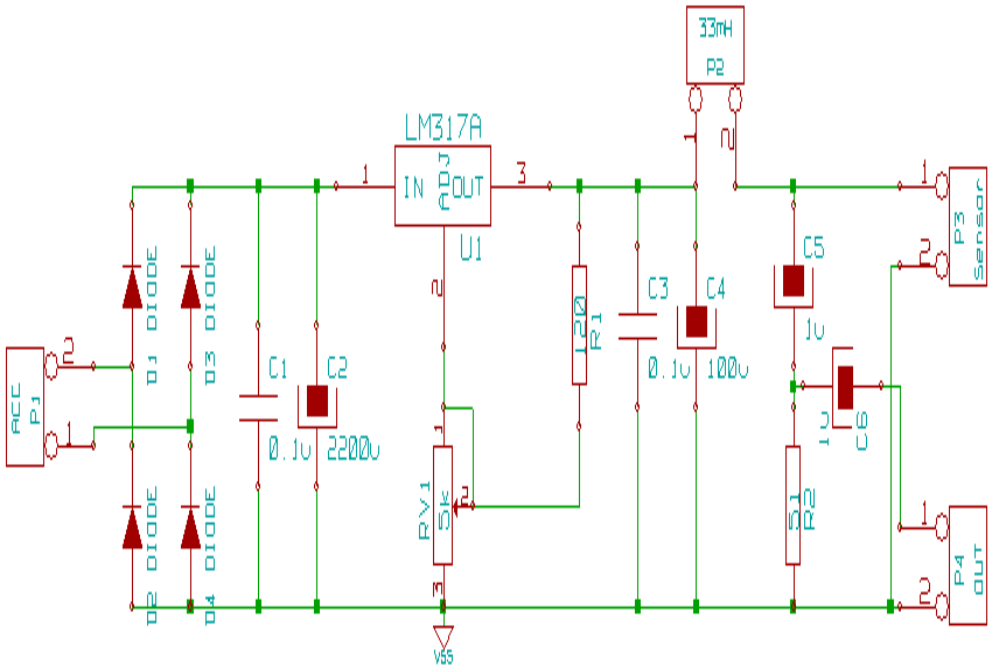
Fuente: Autores

ANEXO E. DESACOPLADOR DE SEÑAL.

Tarjeta alimentadora/desacopladora para el sensor.

Circuito de alimentar le sensor con +28 V d.c y desacoplado de la señal, (ver figura 1.)

Figura 1. Esquema del circuito de electrónico.



Fuente: Autores

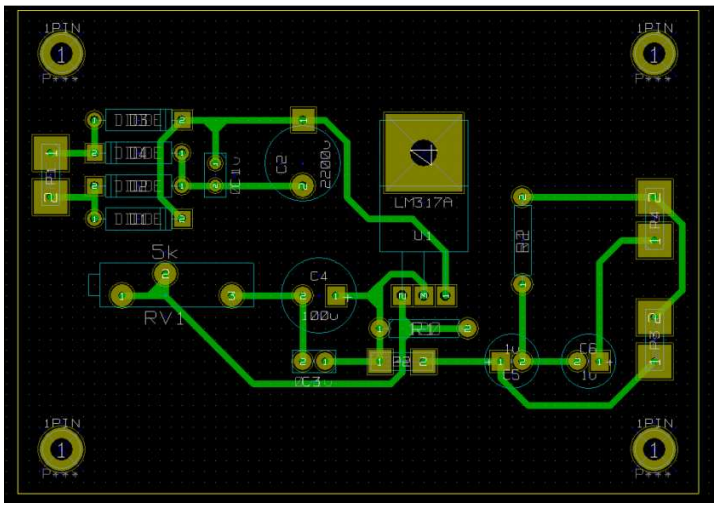
Figura 2. Lista de elementos.

```
 1        C1 -              0.1u : C1
 2        C2 -             2200u : C2V8
 3        C3 -              0.1u : C1
 4        C4 -              100u : C1.5V8V
 5        C5 -                1u : C1V7
 6        C6 -                1u : C1V7
 7        D1 -             DIODE : D4
 8        D2 -             DIODE : D4
 9        D3 -             DIODE : D4
10        D4 -             DIODE : D4
11        P1 -               ACC : C2
12        P2 -              33mH : C2
13        P3 -            Sensor : C2
14        P4 -               OUT : C2
15        R1 -               120 : R4
16        R2 -                51 : R4
17       RV1 -                5k : POT-LIN
18        U1 -            LM317A : TO220
```

Fuente: Autores

Pistas para la conexión de los elementos según el circuito electrónico, figura 3.

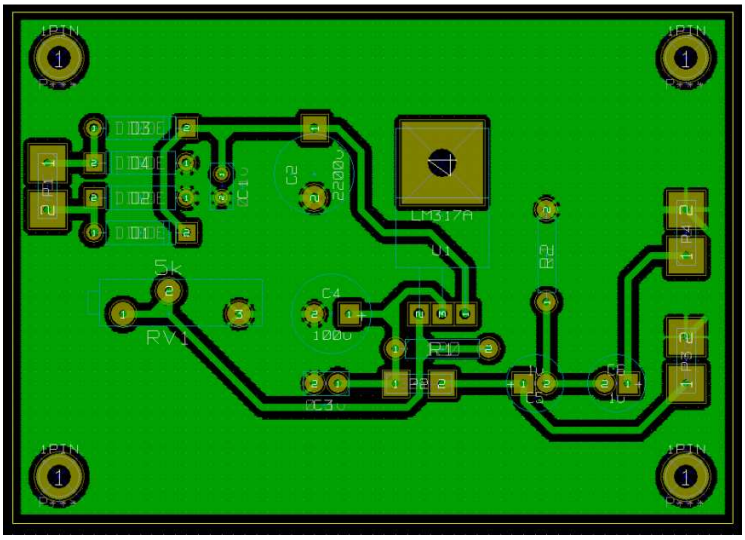
Figura 3. Pistas.



Fuente: Autores

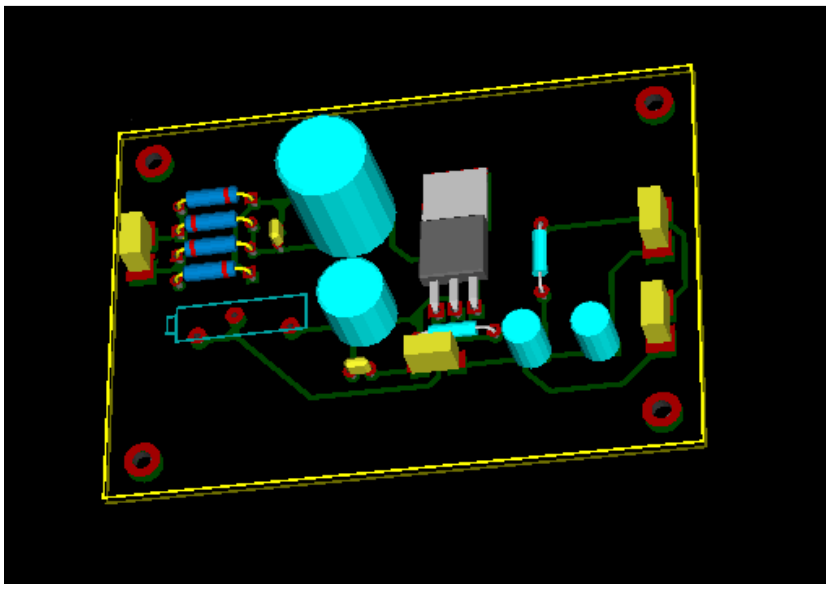
Forma final para realizar el estampado de la tarjeta (ver figura 4.).

Figura 4.Forma para el estampado.



Fuente: Autores

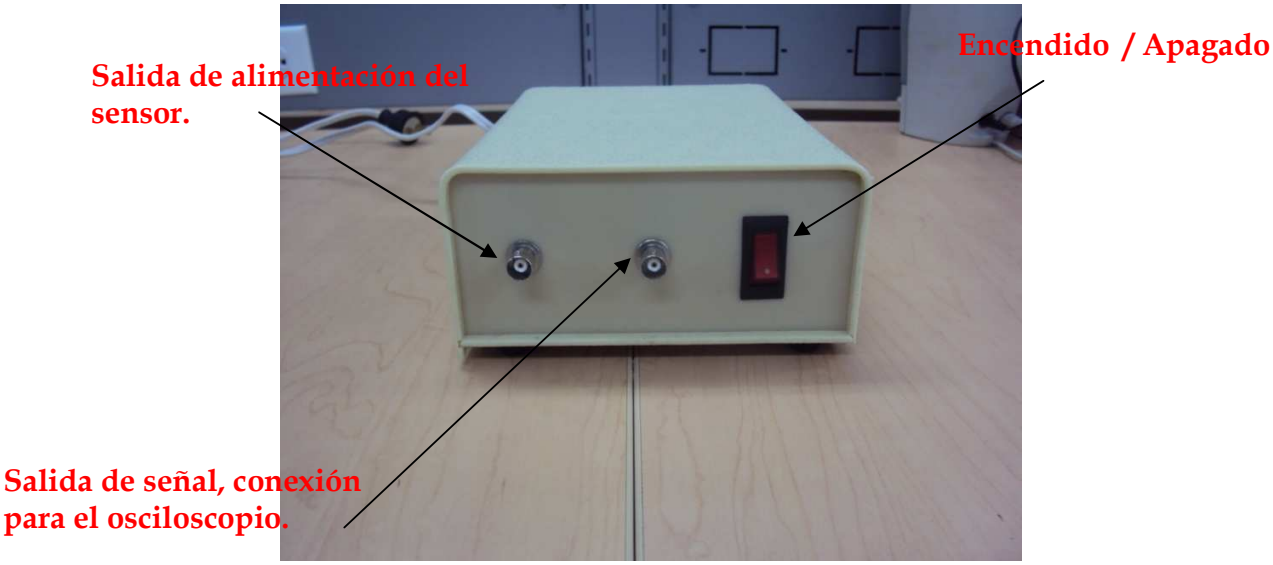
Figura 5. Tarjeta con sus componentes instalados.



Fuente: Autores

Se procede a realizar el montaje en una caja plástica adecuada para contener todos los elementos. (Ver figura 6).

Figura 6. Caja lista para funcionamiento.



Fuente: Autores

ANEXO F. PÉRDIDAS EN TUBERÍAS Y ACCESORIOS.

Tabla 2.2. Coeficientes de rugosidad absoluta ε. (Ahmed N., 1987).

Material	Rugosidad absoluta ε (mm)
Concreto centrifugado nuevo**	0.16
Concreto centrifugado con protección bituminosa**	0.0015 a 0.125
Concreto de acabado liso**	0.025
Concreto alisado interiormente con cemento**	0.25
Concreto con acabado rugoso**	10.00
Acero bridado	0.91 a 9.10
Tubería de acero soldada	0.046
Acero comercial o hierro dulce	0.046
Hierro fundido asfaltado	0.120
Hierro fundido	0.260
Hierro fundido oxidado**	1.0 a 1.5
Hierro galvanizado	0.15
Madera cepillada	0.18 a 0.90
Arcilla vitrificada*	0.15
Asbesto cemento nuevo**	0.025
Asbesto cemento con protección interior de asfalto**	0.0015
Vidrio, cobre, latón, madera bien cepillada, acero nuevo soldado y con una mano interior de pintura, tubos de acero de precisión sin costura, serpentines industriales, plástico, hule. **	0.0015

* Tomado de Saldarriaga J., 1998. ** Tomado de Sotelo A., G., 1982.

2.3.2 Longitudes equivalentes

Tabla 2.8 Longitudes equivalentes a perdidas locales (en metros de tubería de hierro fundido). (Azevedo N., J. y Acosta A., G.

DIAMETRO D mm	pulg.	Codo 90° Radio largo	Codo 90° Radio medio	Codo 90° Radio corto	Codo 45°	Curva 90° R/D = 1½	Curva 90° R/D = 1	Curva 45°	Entrada normal	Entrada de Borda	Válvula de compuerta abierta	Válvula tipo globo abierta	Válvula de ángulo abierta	Té paso directo	Té salida lateral	Té salida bilateral	Válvula de pie	Salida de Tubería	Válvula de retención tipo liviana	Válvula de retención tipo pesado
13	1/2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,1	4,9	2,6	0,3	1,0	1,0	3,6	0,4	1,1	1,6
19	3/4	0,4	0,6	0,7	0,3	0,3	0,4	0,2	0,2	0,5	0,1	6,7	3,6	0,4	1,4	1,4	5,6	0,5	1,6	2,4
25	1	0,5	0,7	0,8	0,4	0,3	0,5	0,2	0,3	0,7	0,2	8,2	4,6	0,5	1,7	1,7	7,3	0,7	2,1	3,2
32	1 1/4	0,7	0,9	1,1	0,5	0,4	0,6	0,3	0,4	0,9	0,2	11,3	5,6	0,7	2,3	2,3	10,0	0,9	2,7	4,0
38	1 1/2	0,9	1,1	1,3	0,6	0,5	0,7	0,3	0,5	1,0	0,3	13,4	6,7	0,9	2,8	2,8	11,6	1,0	3,2	4,8
50	2	1,1	1,4	1,7	0,8	0,6	0,9	0,4	0,7	1,5	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	3,5	14,0	1,5	4,2	6,4
63	2 1/2	1,3	1,7	2,0	0,9	0,8	1,0	0,5	0,9	1,9	0,4	21,0	10,0	1,3	4,3	4,3	17,0	1,9	5,2	8,1
75	3	1,6	2,1	2,5	1,2	1,0	1,3	0,6	1,1	2,2	0,5	26,0	13,0	1,6	5,2	5,2	20,0	2,2	6,3	9,7
100	4	2,1	2,8	3,4	1,5	1,3	1,6	0,7	1,6	3,2	0,7	34,0	17,0	2,1	6,7	6,7	23,0	3,2	6,4	12,9
125	5	2,7	3,7	4,2	1,9	1,6	2,1	0,9	2,0	4,0	0,9	43,0	21,0	2,7	8,4	8,4	30,0	4,0	10,4	16,1
150	6	3,4	4,3	4,9	2,3	1,9	2,5	1,1	2,5	5,0	1,1	51,0	26,0	3,4	10,0	10,0	39,0	5,0	12,5	19,3
200	8	4,3	5,5	6,4	3,0	2,4	3,3	1,5	3,5	6,0	1,4	67,0	34,0	4,3	13,0	13,0	52,0	6,0	16,0	25,0
250	10	5,5	6,7	7,9	3,8	3,0	4,1	1,8	4,5	7,5	1,7	85,0	43,0	5,5	16,0	16,0	65,0	7,5	20,0	32,0
300	12	6,1	7,9	9,5	4,6	3,6	4,8	2,2	5,5	9,0	2,1	102,0	51,0	6,1	19,0	19,0	78,0	9,0	24,0	38,0
350	14	7,3	9,5	10,5	5,3	4,4	5,4	2,5	6,2	11,0	2,4	120,0	60,0	7,3	22,0	22,0	90,0	11,0	28,0	45,0

*** Los valores indicados para válvulas tipo globo se aplican también a llaves para regaderas y válvulas o llaves de descarga.**

1975)

Nota: las longitudes equivalentes de la tabla corresponden a tuberías de hierro fundido. Deben usarse factores de corrección para otros materiales, FC = $(C_{material}/100)^{185}$.

ANEXO G. ARTÍCULO.

DETECCIÒN DE CAVITACIÓN EN UNA BOMBA CENTRÍFUGA UTILIZANDO EMISIONES ACÚSTICAS

Diego Roberto Gelvez Diaz
Ingeniero Mecánico
diego gelvez@hotmail.com
Jhony Alexander Martelo Parada
Ingeniero Mecánico
jhonymartelo@hotmail.com
Universidad Industrial de Santander

1. INTRODUCCIÓN

En las plantas industriales se espera un funcionamiento de manera continua con capacidad plena con el fin de satisfacer las necesidades de producción. Cualquier anomalía o defecto en la maquinaria o equipo debe ser detectado y analizados en su etapa inicial para evitar grandes problemas. Por tanto, el monitoreo basado en condición de la maquinaria es de gran importancia en la industria, ya que mantiene la planta en optimas condiciones para una máxima producción, además permite detectar y diagnosticar fallas en su etapa incipiente para evitar consecuencias graves, daños y costos por tiempo de inactividad; con los avances tecnológicos se hace más fácil detectar las fallas, ya que se cuenta con sistemas de vibraciones mecánicas, análisis de aceite, análisis de termo-grafía infrarrojo, análisis de ultrasonido, monitoreo de condición, entre otras [1,2,3,4].

Normalmente, las fallas de una máquina y los problemas pueden ser detectados e identificados mediante la comparación de señales de la máquina en funcionamiento en condiciones normales y anormales [3, 5]. Cuando la máquina se deteriora y trabaja en mal estado, varias de sus partes empiezan a vibrar y generar frecuencias al azar y amplitudes que pueden ser detectados en la estructura de la máquina. Generalmente la mayoría de los materiales emiten un cierto nivel de señales sísmicas cuando se somete a tensión o deformación. Este fenómeno se refiere a la emisión acústica (EA) [6, 7].

Las EA se han aplicado en la ingeniería en aplicaciones químicas, físicas y biológicas en procesos, en ensayos no destructivos de estructuras reforzadas y materiales, en mecanizado de materiales, aviones, etc. [2, 7]. Las fallas en máquinas rotativas se generan por crecimiento de grietas, impactos, fricción, desgaste, etc. Estos mecanismos producen señales de ondas elásticas. Estas ondas se propagan a través de la estructura de la máquina. Los sensores acústicos tiene la capacidad y el potencial para detectar fallas en las frecuencias de alto rango de 100 KHz a 1MHz. [6,8].

En este articulo se implementa un sistema para detectar el fenómeno de cavitación con EA a una bomba centrífuga de ½ hp, simulando cuatro escenarios; este esquema de monitoreo permite predecir de una forma no invasiva el estado de la bomba en cuanto al fenómeno de cavitación, para lo cual se adecua un banco de pruebas.

2. MARCO TEORICO

CAVITACIÓN

La cavitación tiene un efecto realmente destructivo (llamado corrosión por cavitación) en la estructura de la bomba centrífuga. Entre las características de una bomba centrífuga que ha sufrido daños por cavitación puede destacarse la erosión de los impulsores de la bomba centrífuga, la cual se da a tal grado, que las paredes del mismo pueden llegar a alcanzar el espesor de un papel, e inclusive, presentar grandes perforaciones con bordes muy afilados.

El fenómeno de la cavitación es un proceso progresivo de varias etapas:

1. **Formación de Burbujas**

   Las burbujas se forman dentro del líquido cuando este se vaporiza. Esto es, cuando cambia desde la fase liquida a la de vapor.

2. **Crecimiento de las Burbujas**

   Si no se produce ningún cambio en las condiciones de operación, se seguirán formando burbujas nuevas y las viejas seguirán creciendo en tamaño. Luego serán arrastradas por el líquido desde el ojo del impulsor hacia los álabes y la periferia del impulsor. Debido a la rotación del impulsor las burbujas adquieren alta velocidad y se desplazan hacia las regiones de alta presión dentro del impulsor donde empiezan a colapsar.

3. **Colapso de las Burbujas**

   A medida que las burbujas se desplazan, la presión que las rodea va aumentando hasta que llegan a un punto donde la presión exterior es mayor que la interior y las burbujas colapsan. El proceso es una implosión. Cientos de burbujas colapsan en aproximadamente el mismo punto de cada álabes. Las burbujas no colapsan simétricamente de modo que el líquido que las rodea se precipita a llenar el hueco produciendo un micro jet. Subsecuentemente los micro jet rompen las burbujas con tal fuerza que produce una acción de martilleo. El martilleo altamente focalizado puede producir desprendimiento de material (socavaciones) en el impulsor.

La siguiente es una descripción detallada de los síntomas más comunes de la cavitación [9]:

- **Reducción de la capacidad de bombeo:**

Las burbujas ocupan un volumen que reduce el espacio disponible para el líquido y esto disminuye la capacidad de bombeo. Si la generación de burbujas en el ojo del impulsor es suficientemente grande, la bomba se puede ‘ahogar’ y quedar sin nada de succión con una reducción total del flujo. La formación y colapso de las burbujas es desigual y disparejo, esto genera fluctuaciones en el flujo y el bombeo se produce en chorros intermitentes. **Este síntoma es común a todos los tipos de cavitación.**

- **Disminución en la generación de cabeza:**

A diferencia de los líquidos, las burbujas son compresibles. La cabeza desarrollada por la bomba disminuye drásticamente debido a que se gasta energía en aumentar la velocidad del líquido empleado en llenar las cavidades que dejan las burbujas colapsadas. **Lo mismo que la reducción en capacidad, este síntoma es común a todos los tipos de cavitación.**

Por lo tanto, el efecto hidráulico de la cavitación en una bomba es que su funcionamiento cae fuera de la curva de desempeño esperada, produciendo una cabeza y flujo mas bajo que el correspondiente a su condición normal de operación

- **Vibración y Ruido anormal:**

El desplazamiento de las burbujas a muy alta velocidad desde el área de baja presión
hacia una zona de alta presión y el subsiguiente colapso crea ondas de choque que producen ruidos y vibraciones anormales. Se estima que durante el colapso de las burbujas se desarrollan ondas de choque con presiones del orden de 104 atmósferas. El sonido de la cavitación puede describirse como algo similar a pequeñas partículas duras chocando o rebotando rápidamente en el interior de una bomba o válvula. Se usan varios términos para describirlo; traqueteo, golpeteo, crepitación, etc. El ruido de una bomba cavitando va desde el golpeteo grave y uniforme (como sobre una puerta) hasta una crepitación aguda y errática (similar a un impacto metálico). El ruido de cavitación pude confundirse fácilmente con el de un rodamiento en mal estado.

La vibración se debe al efecto de cargas disparejas actuando sobre el impulsor y que son generadas por una mezcla no uniforme de líquido y vapor, así como por las ondas de choque por el colapso de las burbujas. La formación y colapso de las burbujas se alternará periódicamente con la frecuencia resultante de la velocidad y numero de álabes. La vibración excesiva por cavitación comúnmente produce fallas en los sellos y/o rodamientos. **Este es el modo de falla más probable en una bomba cavitando**.

EMISIONES ACÚSTICAS

La Emisión Acústica (EA) es la clase de fenómeno que genera ondas elásticas transitorias por la liberación rápida de energía a partir de fuentes localizadas, o las ondas transitorias generadas de este modo. Todos los materiales producen emisiones acústicas, ya sea debido a cargas mecánicas, fugas, cavitación, creación y propagación de fisuras, durante la deformación, etc. Las ondas elásticas se mueven a través del sólido hacia la superficie, donde son detectadas por los sensores. Estos sensores son transductores que convierten las ondas mecánicas en ondas eléctricas. De este modo se obtiene la información acerca de la existencia y ubicación de posibles fuentes. Esto es similar a la sismología, donde las ondas sísmicas alcanzan las estaciones situadas en la superficie de la tierra. Luego del procesamiento de las señales, se obtiene la ubicación de los centros sísmicos. [6, 7,10].

Las bombas centrífugas siempre tienen un componente de vibración importante en la frecuencia de paso de álabes, que es igual al número de álabes de la impulsora por las RPM. Si la amplitud se incrementa de manera significativa, por lo general se le atribuye a un problema interno como una desalineación, daño en los álabes, o cavitación [10, 11].

Las ventajas de las EA como herramienta clave para monitorear una máquina rotodinámica para localizar zonas de alta actividad de energía asociadas a fallas se enfocan a la detección en línea siendo clave para el mantenimiento predictivo, alguna de estas fallas son: [10, 11, 12].

- Detecta fallas que sólo se manifiestan con el equipo energizado y en situaciones de alta

o baja carga.

- Se pueden filtrar ruidos ambiente y normales de operación
- Se obtiene la posición de la falla
- Se pueden analizar unidades críticas que requieran un monitoreo continuo.
- Se puede determinar la intensidad de la falla y su tendencia

3. EXPERIMENTACION

Para el estudio del fenómeno de cavitación y su relación con la activación de algunas frecuencias en la señal de emisiones acústica se diseña un banco que está compuesto por una bomba centrífuga de ½ hp, un cilindro de 30L de capacidad adecuado para abastecer la bomba centrífuga (tanque) y soportar presión de vacío, una bomba de vacío de ½ hp, un sensor piezoeléctrico, un osciloscopio y un computador para el análisis de los datos.

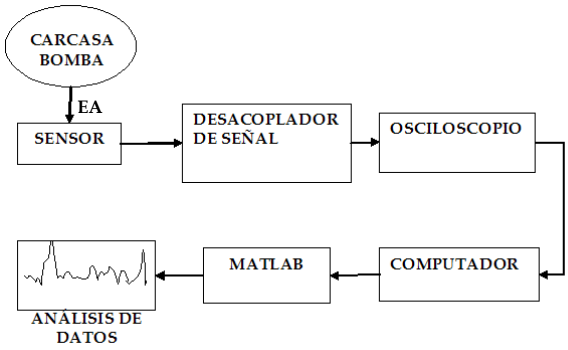
En la figura 1 se muestra el banco con todas sus partes.

Figura 1. Banco de Cavitación

Para la captación de la señal se utiliza un sensor que contiene un preamplificador integrando, conectado una entrada FET de bajo nivel de ruido y un preamplificador de 40 dB.

Para el procesamiento de la señal se utilizara un osciloscopio con una frecuencia de muestreo de 25 MHz el cual permite capturar la señal del sensor proveniente del desacoplador y llevarla a un computador para su análisis en Matlab, como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Esquema para captura y procesamiento de señal



El osciloscopio permite guardar datos de la señal. Para el análisis con Matlab sólo se requerirá de los datos de la señal, los cuales se encuentra en un formato .csv, estos datos se pueden leer por medio de Excel, los cuales permite trabajar en Matlab de forma sencilla y así obtener el espectro acústico y su respectiva transformada FFT.

4. PRUEBAS

Para realizar el estudio propuesto se plantearon cuatro (4) escenarios en los cuales se tienen diferentes grados de severidad en la cavitación, estos son:

Escenario 1, 100% del caudal nominal (42 gpm)
Escenario 2, 95% del caudal nominal (40 gpm)
Escenario 3, 83% del caudal nominal (35 gpm)
Escenario 4, 60% del caudal nominal (25 gpm)

Para cada escenario se registró presión de succión Ps, presión de descarga Pd y presión en el tanque Po la cual variamos hasta alcanzar la presión de vapor del agua y lograr que la bomba Cavite a diferentes niveles, estos datos se calcula la altura alcanzada por la bomba H, siendo este último término nuestra guía para determinar la caída del 3% en la altura en la que la cavitación se considera incipiente, se calculó una relación porcentual entre H(3%)/H, como guía para la toma de los espectros, es decir: $\frac{H(3\%)}{H} \approx 1$, se tiene cavitación incipiente con una caída del 3% de la altura alcanzada por la bomba [9, 12, 13].

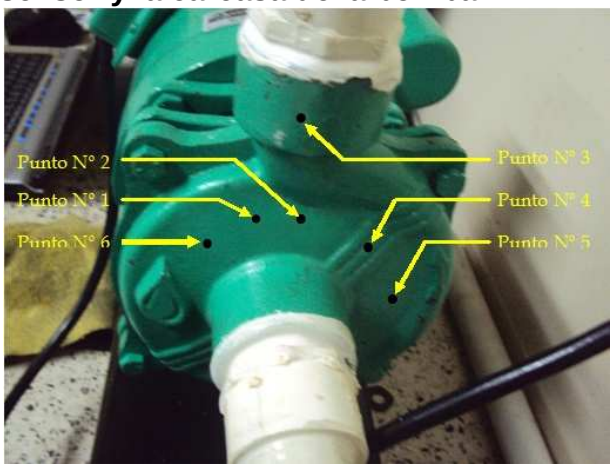
En cada escenario se tomaron tres espectros correspondientes a la condición normal, cavitación incipiente y cavitación severa y se calculó el RMS para cada muestra y se utilizó como un indicador de falla para el respectivo análisis.

Se tomo los espectros en:

1. Bomba trabajando en condición normal
2. Bomba con cavitación incipiente
3. Bomba con cavitación severa

Los espectros fueron tomados en el mismo punto en la carcasa de la bomba para cada caso; la escogencia de este punto de contacto se llevo a cabo con pruebas preliminares en diferentes puntos de la carcasa hasta encontrar el más adecuado para el estudio de la señal, dejando como resultado el punto mostrado en la figura 3, donde se muestra los puntos de las diferentes pruebas, dando como resultado que el punto 1 es el mejor para realizar la inspección en la bomba centrífuga.

Figura 3. Punto de contacto entre el sensor y la carcasa de la bomba.



5. ANÁLISIS DE DATOS

5.1. Caso 1, caudal (100%)

Tabla 1. Datos del caso 1

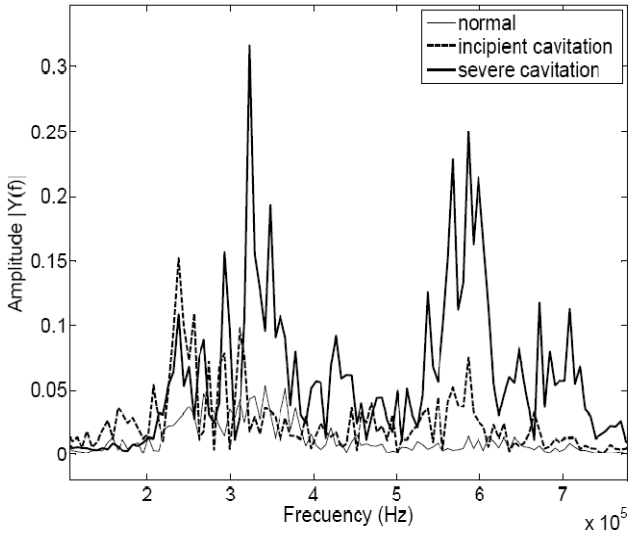
Pd (Pa)	Ps(Pa)	H (m)	Po(Pa)	%
110316	29997.5	14.3031	0	0.97
68947.6	63328.1	13.4838	33330.6	1.02894
55158.1	69994.3	12.7576	39996.7	1.08751

H(3%)= 13.874 m

Tabla 2. Valores RMS

ESTADO	RMS
Normal	0.0081
Cavitación incipiente	0.0112
Cavitación severa	0.0154

Figura 4, espectros, caso 1



En la figura 2 se observan los espectros correspondientes a las casos normal, incipiente y cavitación severa.

En esta figura se puede apreciar el aumento de energía en las frecuencias en el rango entre 200 KHz y 700 KHz con en el aumento de la severidad de la cavitación. En la tabla 2 se encuentra el valor RMS del ancho de banda comprendido entre 200 KHz y 700 KHz siendo el rango donde se presenta la mayor energía. Este valor RMS se puede candidatizar como el valor de tendencias que permite evaluar la severidad de la cavitación.

5.2. Caso 2, caudal (95%) de 40 gpm

Tabla 3. Datos del caso 2

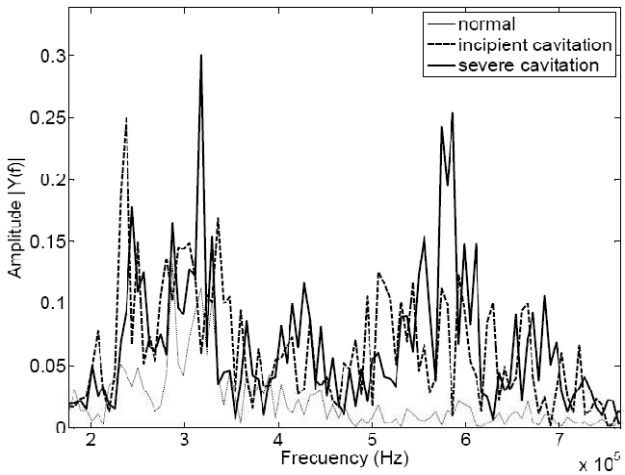
Pd (Pa)	Ps(Pa)	H (m)	Po(Pa)	%
110316	24664.6	13.7595	0	0.97
62052.8	71994.1	13.6643	46662.8	0.97676
27579	77327	10.6938	53329	1.24808

H(3%) 13.3467 m

Tabla 4. Valores RMS

ESTADO	RMS
Normal	0.0067
Cavitación incipiente	0.0103
Cavitación severa	0.0139

Figura 5, espectros, caso 2



En este caso se encuentra nuevamente la activación de frecuencias en el rango de 200 KHz y 700 KHz como se observa en la figura 4. En la tabla 4 se muestra el valor RMS para este caudal con cada uno de los grados de severidad planteada.

7.3. Caso 3, caudal (83%) de 35 gpm

Tabla 5. Datos del caso 3

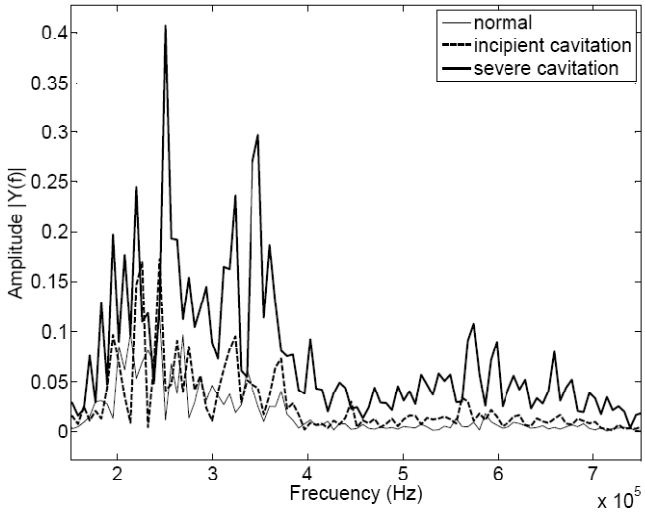
Pd (Pa)	Ps(Pa)	H (m)	Po(Pa)	%
131000	19998.4	15.3923	0	0.97
89631.8	54662.2	14.7089	33330.6	1.01507
68947.6	74660.5	14.639	53329	1.01992

H(3%)= 14.9306 m

Tabla 6. Valores RMS

ESTADO	RMS
Normal	0.0056
Cavitación incipiente	0.0068
Cavitación severa	0.0154

Figura 6, espectros, caso 3



Ya con un caudal del 80% del inicial se tiene frecuencias entre 200 KHz y 400 KHz, se muestra un comportamiento aleatorio, se observa un crecimiento proporcional del RMS excepto en el caso de cavitación por encima de la incipiente igual que el primer caso.

5.4. Caso 4, caudal (60%) de 25 gpm

Tabla 7. Datos del caso 4

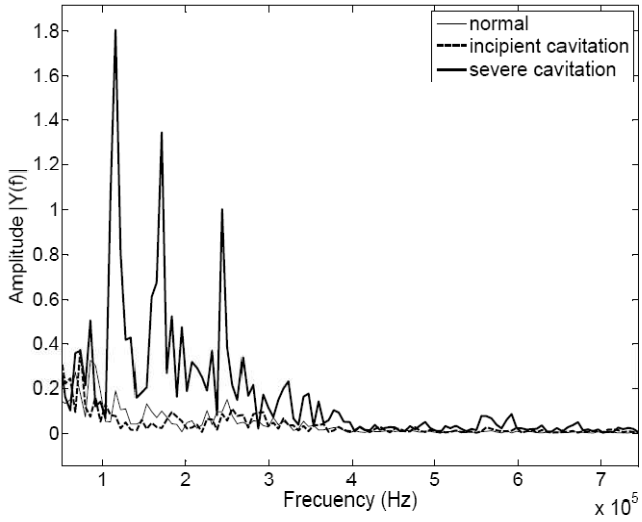
Pd(Pa)	Ps(Pa)	H (m)	Po(Pa)	%
165474	5546.21	17.4333	0	0.97
124106	41329.9	16.864	33330.6	1.00275
103421	61328.3	16.7941	53329	1.00692

H(3%)= 16.9103 m

Tabla 8. Valores RMS

ESTADO	RMS
Normal	0.0101
Cavitación incipiente	0.0198
Cavitación severa	0.0346

Figura 7, espectros, caso 4



En el último caso se tiene un intervalo de frecuencias entre 150 KHz y 400 KHz con picos de amplitudes considerables comparadas con los casos anteriores, es bueno resaltar que el sensor utilizado presenta mayor estabilidad con frecuencias por encima de 200 KHz; se puede concluir que la energía espectral en el rango establecido para la detección aumenta en

la medida que el caudal de la bomba se reduce.

Los resultados del análisis de emisiones acústicas han mostrado una clara relación entre la EA y la cavitación, se observó un aumento del valor RMS para el ancho de banda escogido a diferentes niveles de EA. Sin embargo, se observó una reducción del RMS en nivel de cavitación por encima del la cavitación incipiente en algunos los escenarios.

6. CONCLUSIONES

Las principales ventajas del análisis de espectros acústicos para el mantenimiento predictivo, comparado con otras técnicas pueden resumirse:

- Es un método no intrusivo en su totalidad.
- Toda la información se consigue con un sólo sensor, lo que se compara favorablemente con sistemas basados en vibración que frecuentemente necesita de varios acelerómetros.
- Se puede detectar la falla antes de que ocurra, es decir en un estado incipiente.
- No necesita de aislamiento acústico con el entorno.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Charles, E. An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering. Boston, Massachusetts. Editorial Mc. Graw-Hill, (1997).

[2] B.R. Varlo, AE analysis of high voltage insulation IEE Proc. SCi.Mechnol. Vol.146. No. 5, September 1999.

[3] H. Reginald Hardy, Jr. Acoustic Emission / Micro seismic Activity, Volume 1, Principles, Techniques and Geotechnical Applications, The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, USA, 2003

[4] Paul Frake, The application of AE monitoring as a control tool in pharmaceutical development, the Royal Society of Edinburg 2002.

[5] Beattie, A. G. Acoustic Emission, Principles and Instrumentation. Journal of Acoustic Emission, 2(1983)1/2 January/April,pp.95-128

[6] AzovtsevYu.A, Barkobv A.V., Yudin I.A., Automation Diagnostics of Rolling Element Bearings using Enveloping Methods, [1994].

[7] B. Samanta, Khamis R. AlBalushi and Saeed A. Al-Araimi, Bearing fault detection using Artificial Neural NETWORKS AND Genetic Algorithm, Sultan Qaboos University, P. O. Box 33, Muscat 123, Sultanate of Oman, 2004.

[8] Duncan L. Carter, U.S. Patent Number 5, 477, 730,"Rolling element Bearing Condition Testing Method and Apparatus" issued Dec. 26, 1995.

[9]R.L. Mott,mecanica de fluidos aplicada, 5ta edición.

.

[10] L. Alfayez; D. Mba; G. Dyson, The application of acoustic emission for

detecting incipient cavitations and the best efficiency point of a 60 kW centrifugal pump: case study, NDT&E international, 10 Dic. 2004

[11] W. Stanisławski, M. Zmarzły, M. Szmechta, Optimization of efficiency coefficient in a constant pressure inverter driven pump-set", PrzeglądElektrotechniczny, 2008.

[12]Shinfuku Nomura1 and Masafumi Nakagawa. Analysis of an ultrasonic field attenuated by oscillating cavitation, Department of Mechanical Engineering, Ehime University,Bunkyo-cyo, Matsuyama.

[13] CRANE, División de Ingeniería. Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías. Mc. Graw Hill. 1992.

[14] Pedro Fernández Díaz, Bombas centrífugas y volumétricas, 2002.